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 – 2016. ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

Сборник материалов XII Международной научно-технической конференции
(Ижевск, 23–25 ноября 2016 года)

Издательство ИжГТУ
имени М. Т. Калашникова
Ижевск 2017

УДК 681.2(06)
П75

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Якимович Б. А. – председатель программного комитета, д-р техн. наук, ректор ИжГТУ;
Галиахметов Р. А. – зам. председателя, д-р экон. наук, проф., проректор по инновационной работе;
Хворенков В. В. – зам. председателя, д-р техн. наук, проф., проректор по учебной работе;
Алексеев В. А. – зам. председателя, д-р техн. наук, проф., секретарь ученого совета ИжГТУ;
Абилов А. В. – зам. председателя, канд. техн. наук, доц., декан приборостроительного факультета, ответственный организатор конференции;
Тюрин А. П. – зам. председателя, д-р техн. наук, проф., зам. начальника управления научно-исследовательских работ;
Мурашов С. А. – д-р техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», технический редактор сборника материалов конференции;
Глушков В. А. – д-р техн. наук, доц. кафедры «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры», директор «СКБ космического приборостроения имени В. А. Шутова»;
Шелковников Ю. К. – д-р техн. наук, проф., гл. н. с. Института механики УрО РАН;
Ижболдин И. К. – первый зам. ген. директора – директор по развитию производства ООО «Корпорация «Аксион»;
Серяков А. Г. – зам. главного конструктора ОАО «Ижевский радиозавод»;
Бохонько Д. В. – технический директор ДООО «ИРЗ – Локомотив»;
Александров А. П. – главный конструктор ОАО «ИЭМЗ «Купол»;
Бобков А. Б. – технический директор ДООО «ИРЗ – Локомотив»;
Шперлинг А. А. – директор филиала ОАО «Ростелеком» по Удмуртской Республике;
Ханжин В. В. – директор Ижевского регионального отделения Уральского филиала ОАО «МегаФон» по Удмуртской Республике.

НАУЧНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Шишаков К. В. – канд. техн. наук, доц., и. о. зав. кафедрой «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры», рук. секции 1;
Муравьев В. В. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», рук. секции 2;
Ломаев Г. В. – д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», рук. секции 2;
Морозов В. А. – канд. техн. наук, доц. кафедры «Электротехника», рук. секции 3;
Нистюк А. И. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Сети связи и телекоммуникационные системы», рук. секции 4;
Копысов А. Н. – канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Радиотехника», рук. секции 4;
Соболев В. В. – д-р. физ.-мат. наук, зав. кафедрой «Физика и оптотехника», рук. секции 5;
Айзикович А. А. – канд. физ.-мат. наук, доц., зав. кафедрой «Прикладная математика и информатика», рук. секции 6.

П75 **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).

ISBN (Электронное издание) 978-5-7526-0767-7

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 978-5-7526-0767-7
(Электронное издание)

© Издательство ИжГТУ имени
М. Т. Калашникова», 2017

Содержание

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

Ахметгалиев Р. Р., *Долгачева Л. О.*, *Ушаков П. А.* Исследование характеристик мультивибратора дробного порядка 10

Бабошкин Г. Д., *Дулесов С. Г.*, *Бабошкина А. А.*, *Ушаков П. А.* Особенности проектирования и преимущества цифровых и аналоговых ПИД-регуляторов 19

Белослудцев В. Н., *Бояринцева Е. С.*, *Драчев А. В.*, *Рылов С. А.*, *Широбоков В. Н.*, *Глушков В. А.*, *Богатырев К. А.*, *Широких С. А.* Обзор миссий некоторых университетских спутников 26

Беляева Е. А. Исследование возможности отбраковки танталовых конденсаторов по напряжению пробоя танталового порошка анодной поверхности 33

Верба Б. П., *Мосунов Д. Г.*, *Шишаков К. В.* Способы построения согласующих антенных устройств 43

Гаврилов А. В., *Зорин К. А.*, *Шумилова Т. А.*, *Яшина Д. С.*, *Глушков В. А.* Сравнение возможностей анализа динамических характеристик линейных систем в программах *Matlab* и *Scilab* 51

Глушков В. А., *Балашов А. В.*, *Халисламова А. Р.*, *Кузнецова В. С.*, *Буторина Ю. В.* Сравнение возможностей схемотехнического анализа в программах OrCAD 9.2 и OrCAD 17.2 59

Глушков В. А., *Гравшин В. Г.* Обзор метанольных топливных элементов 64

Долгачева Л. О., *Глушков В. А.* Система управления нагревателем пиролизной установки 68

Качалов О. Б., *Якунина С. А.*, *Ямпурин Н. П.* Методы снижения погрешности измерительных приборов 74

Кузнецов П. Л., *Кузнецова В. А.* Анализ электрических параметров танталовых объемно-пористых (оксидно-электролитических) конденсаторов на основе физико-химических процессов и схем их замещения 79

Подсизерцев М. А., *Дулесов С. Г.*, *Ушаков П. А.* Концепция синтеза элементов с фрактальным импедансом на основе шестиполюсных *RC*-ЭРП 88

Садыков А. Р., *Тугбаев Ю. Г.*, *Лучкин Д. С.*, *Байтеряков А. В.* Создание перспективной бортовой аппаратуры командно-измерительной системы стандарта *ESA/CCSDS* 93

Тарануха В. П., *Тарануха Н. Л.* Разработка электронных учебных курсов по профессиональной переподготовке инженерных кадров в области приборостроения 101

Тураев А. В. Устройство удаленного управления «умным домом» 109

Хабибуллин Р. Д., *Шамсиахметов О. Я.* Поиск визуальных фрактальных размерностей окружающего мира 116

Черняев А. Г. Электроника студенческой ракеты 121

Чумаков В. В., *Тарануха В. П.*, *Глушков В. А.*, *Вшивцев А. Г.* Опыт проведения открытых занятий по астрономии в ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» в 2014–2016 гг. 131

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

Belal A., *Gharib M.*, *Zorin A. N.* Design and Psychological Benefits of Using 3D Printing for Temporary Emergency Housing. Case Study: Za'atari Camp in Jordan 135

Байтеряков А. В., *Казаков Р. С.*, *Синцов М. А.* Скорость ультразвуковых волн в рельсах с наработкой 142

Биринцева Е. С., *Смольников М. В.*, *Мурашов С. А.*, *Мурашова Д. С.* Теоретическая оценка параметров емкостного датчика для измерения статического давления при компрессии мягких биологических тканей 152

Богдан О. П., *Дудина Ю. С.*, *Бабайлов Н. А.* Оценка интенсивности ультразвукового излучения диагностического сканера при различных вариациях его настроек 157

Богдан О. П., *Климова А. А.*, *Волков В. В.* Исследование влияния параметров измерительной установки на амплитудно-частотные и электрические характеристики пьезопластины, нагруженной на различные среды 163

Богдан О. П., *Подсизерцева М. А.* Исследование акустических свойств машинного масла различных марок 170

Булдакова И. В., *Волкова Л. В.*, *Будрин А. Ю.*, *Казанцев С. В.*, *Понькин М. А.*, *Синцов М. А.* Чувствительность разных типов волн при ультразвуковой структуроскопии сварных швов рельсов 176

Волкова Л. В., *Злобин Д. В.*, *Белых А. П.* Поиск информативных параметров сигналов электронной аускультации 183

Ворончихин С. Ю., *Самокрутов А. А.*, *Седелев Ю. А.*, *Полянкин Г. А.*, *Исмагилов М. Б.*, *Муравьева О. В.* Результаты опытно-промышленной эксплуатации автономного роботизированного внутритрубного сканера-дефектоскопа A2072 IntroScan для диагностики технологических трубопроводов 190

Гребнев В. Л. Оптимизация радиометрической аппаратуры, применяемой в медицине и экологии 202

Громова И. А., *Мурашов С. А.*, *Мурашова Д. С.* Исследование свойств материалов фантомов мягкой биологической ткани и вязкоупругих сред 206

Зайнаева Т. П., *Егоркина С. Б.* Влияние вращающегося электрического поля низкой частоты на систему «мать – плацента – плод» 212

Злобин Д. В., *Гущина Л. В.* Оптимизация конструкции пьезоэлектрических преобразователей крутильной волны для контроля линейно-протяженных объектов 218

Казанцев С. В., *Булдакова И. В.*, *Понькин М. А.*, *Будрин А. Ю.*, *Волкова Л. В.* Исследование распространения головной волны в рельсах со сварным стыком 224
Мирошников В. В., *Дия А.* Дистанционный контроль электромагнитных характеристик биологических объектов 232
Мирошников В. В., *Петрущенко Т. В.* Контроль динамики развития дефекта действующих промышленных объектов 239
Мирошников В. В., *Швец С. Н.* Визуализация дефектов при трубной дефектоскопии 246
Михайлов С. Е., *Мкртчян С. С.*, *Стрижак В. А.* Адаптация датчика дефектоскопа АДНШ для контроля композитной арматуры 252
Мкртчян С. С., *Михайлов С. Е.*, *Стрижак В. А.* Особенности расчета информативных параметров для волноводного метода акустического контроля композитной арматуры 259
Муравьев В. В., *Якимов Д. А.* Влияние твердости рельсов на скорость распространения головных волн 266
Муравьев В. В., *Тапков К. А.* Возможности использования акустоупругого метода для контроля дифференцированно закаленных рельсов 272
Мышкин Ю. В., *Фотина А. А.*, *Кощеева Ю. О.* Влияние количества элементов в фазированной решетке на эффективность фокусировки в трубах большого диаметра 276
Петров К. В., *Башарова А. Ф.*, *Пушина Г. Л.*, *Недзвецкая Е. В.* Моделирование распространения акустических волн в цилиндрических объектах с дефектами в *COMSOL Multiphysics* 284
Петров К. В., *Пушина Г. Л.*, *Башарова А. Ф.*, *Стрелков В. С.* Моделирование формирования акустического поля проходного электромагнитно-акустического преобразователя в *COMSOL Multiphysics* 292
Пономарева О. В. Динамическое измерение коэффициентов параметрического дискретного преобразования Фурье с частотой дискретизации сигнала 299
Руденок В. А. Твердотельный полярограф 306
Степанов В. А., *Белых В. В.* Метод картирования результатов фрактального анализа флюорограмм органов грудной клетки человека 310
Шалобаев Е. В., *Перепелица Ф. А.*, *Красноруцкая Н. С.* Аддитивные технологии в машиностроении 319
Шелковников Ю. К., *Метелева А. А.* Повышение стабильности координатной характеристики информационно-измерительных систем с времяимпульсным режимом работы телевизионного сканистора 324
Якимов А. В., *Волкова Л. В.* Исследование остаточных напряжений по сечению рельсов акустическим методом 331

Секция 3. **Приборы в системах управления и контроля**

Ардашев Е. Я., *Штин А. А.* Разработка лабораторного стенда для исследования цифровых ваттметров *ROBITON* PM1 и PM2 338

Джауль А. Л., *Стародубцева В. А.* Анализ совместимости микроконтроллера LOGO! с электроприводом пассажирского лифта.....343
Кожевников К. В., *Штенников И. В.* Разработка источника питания асинхронного двигателя вентилятора.....347
Кокуйский М. О., *Штин А. А.* Разработка стенда для измерения характеристик маломощных полевых транзисторов.....352
Матросов Н. С., *Стародубцева В. А.* Анализ путей повышения производительности и надежности работы металлообрабатывающего цеха.....356
Морозов В. А., *Новоселов М. Л.*, *Сибгатуллин Б. И.*, *Туктарев Н. В.* Исследование характеристик ионистора для гибридного источника питания унифицированной машины технологического электротранспорта.....360
Орлов В. А., *Стародубцева В. А.*, *Тюлькин М. В.* Использование ультразвукового дальномера при исследовании режимов работы таймеров микроконтроллеров *AVR*.....366
Родионов И. Д., *Морозов А. В.*, *Морозов В. А.* Алгоритм совместной работы аккумулятора, ионистора и тягового электродвигателя технологического электротранспорта.....369
Серафимов Н. П., *Стародубцева В. А.* Обоснование экономичности использования регулируемого частотного электропривода для насосов теплового пункта.....374
Симонов М. В., *Шишаков К. В.*, *Сапегин Д. А.*, *Денисов С. В.*, *Казанцев В. А.* Разработка алгоритма свободного передвижения автономного передвижного устройства с возвратом на исходную точку.....378
Стародубцева В. А., *Аглямов Д. Г.* Анализ возможности использования электромагнитных муфт в испытательных стендах.....383
Стародубцева В. А., *Красноперов Р. Н.* Анализ влияния геометрии статора и ротора обращенного асинхронного двигателя на его рабочие характеристики.....387
Стародубцева В. А., *Мазитов А. С.* Альтернативная энергия. Солнечные батареи.....394
Тюлькин М. В., *Мельников И. А.*, *Штенников И. В.* Разработка устройства на микроконтроллерах для приема-передачи данных по инфракрасному каналу.....398
Хакимов Н. Т., *Комарский Р. И.* Конструирование универсального цифрового измерителя частоты «Омега-1000».....402
Штенников И. В. Методика определения электрической прочности жидкой изоленты.....410
Штин А. А., *Безруков П. Е.* Трехфазный генератор для лабораторных работ.....415
Штин А. А., *Мельников О. С.* Лабораторный стенд для испытаний токовых клещей.....419

Секция 4. **Информационные технологии в радиотехнике и связи**

Абилов А. В., *Зиновьева Е. Л.*, *Титов В. В.*, *Машковцев В. С.* Обзор квадрокоптера *Erle-Copter* на базе контроллера *Erle-Brain 2* 424

Белоусов А. Ю., *Захватов А. В.*, *Шаимов А. Ю.*, *Хатбуллин Р. А.* Разработка, моделирование и реализация программ на ПЛИС для измерения АЧХ канала 432

Бояршинов М. А., *Кайшев В. Н.*, *Нистюк А. И.* Особенности выбора оборудования при организации корпоративной сети телефонной связи между несколькими удаленными объектами 441

Бояршинов М. А., *Шабалина О. М.* Сравнение энергетической эффективности от выбранного вида фазовой манипуляции в подканале 455

Воробьев А. М., *Мальцева А. А.* Модернизация сети сотовой связи стандарта 3G в СЦ «Азбука ремонта» 459

Ворсина А. С., *Шигапов Р. И.* Сравнение вариантов синтеза частот в приемопередающих трактах в диапазоне до 300 МГц 466

Гумиров Р. Ф. Разработка блока ручного управления манипулятором с элементами автоматизации 472

Ермаков Ф. М., *Зырянов К. А.*, *Копысов А. Н.*, *Хатбуллин Р. А.*, *Мерзляков К. А.* Тестирование цифровых микросхем и подготовка стендового оборудования для измерения параметров 476

Кайсина И. А., *Ершов Д. С.*, *Чайников М. А.*, *Васильев Д. С.*, *Абилов А. В.* Обзор метода *MPLS VPN* для построения корпоративных сетей с *mesh*-топологией 484

Королев Н. А., *Рукавишников Я. А.*, *Зайцева Е. М.* Интерактивное учебное пособие для обучения работе в среде *MicroCap* по дисциплине «Основы компьютерного проектирования радиоэлектронных средств» 489

Мартынов А. О., *Печников А. О.*, *Зайцева Е. М.* Сравнительная характеристика программ схемотехнического моделирования цифровых и аналоговых устройств 493

Петрушина И. Б., *Косарев Р. А.* К вопросу о расчете переходной характеристики в радиотехнических цепях 499

Петрушина И. Б., *Тихонов К. А.* К вопросу о расчете частотных характеристик в радиотехнических цепях 503

Сенаторов Л. А., *Зайцева Е. М.* Использование средств радиосвязи в организации воздушного движения 509

Сидорина В. А., *Касимова С. Г.* Использование тестовых материалов для контроля знаний студентов направлений «Радиотехника» и «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» 515

Сидорина В. А., *Михайлова А. О.* Формирование познавательной мотивации студентов радиотехнического профиля при использовании новых форм лекций в учебном процессе 523

Сидорина В. А., *Пастухова Е. И.*, *Пастухов И. С.* Проектирование сети радиодоступа по технологии LTE в коттеджном поселке «Сосновый Бор» 529

Тихонов К. А., *Кудрявцев Н. А.*, *Зайцева Е. М.* Разработка словаря пользователя программы схемотехнического моделирования *Micro-Cap 11* 532
Шаимов А. Ю., *Копысов А. Н.*, *Богданов А. А.* Создание радиолокационной установки для оценки эффективной площади рассеяния 536
Шамонов М. Ю., *Абилов А. В.* Мобильные самоорганизующиеся сети беспилотных летательных аппаратов *Flying Ad Hoc Networks* (*FANETs*) 542
Юрков А. А., *Жихарев А. С.*, *Тенсин Е. С.* Моделирование системы управления с использованием ПИД-регулятора в системе *MATLAB* 551

Секция 5. **Физические методы в приборостроении**

Алексеев В. А., *Девятов Н. А.*, *Усольцев В. П.*, *Юран С. И.* Оптоэлектронное устройство устранения аварийных сбросов на промышленных предприятиях в сточных водах 556
Алексеев В. А., *Перминов А. С.*, *Юран С. И.* Математическое моделирование рассеяния света биотканью с помощью метода Монте-Карло 562
Ардашев С. А., *Перминов А. С.*, *Юран С. И.* Генератор тестовых сигналов для фотоплетизмографов 569
Бурнышев И. Н., *Калюжный Д. Г.*, *Фукалов В. А.* Акустическая эмиссия при наводороживании циркониевого сплава Э125 574
Дойников Р. Г., *Пешкова О. В.*, *Калугин А. И.* Лазерная установка для измерения изменения температуры поверхности металла 580
Ежов А. А., *Калугин А. И.* Разработка фотометрического прибора для измерения содержания тропонина в крови 584
Знаменский М. С., *Калугин А. И.* Лазерная система оперативного картографирования на базе беспилотного летательного аппарата 588
Калюжный Д. Г., *Александров В. А.*, *Рубцова Н. А.* Модификация поверхности Ag-Pd резистивной толстой пленки 593
Кривенков Р. Ю., *Михеев Г. М.* Оптическое ограничение мощности в суспензиях детонационных наноалмазов, многослойных углеродных нанотрубок и желтом фильтре ЖС18 597
Кутузова М. Ю., *Мирошников В. В.*, *Лавренченко А. В.* Моделирование процесса контроля динамических характеристик нанобиологических объектов 604
Мерзляков М. М., *Калугин А. И.* Установка для измерения коэффициента температуропроводности методом лазерной вспышки 611
Мирошников В. В., *Булыгин Н. С.*, *Махортова Н. В.* Электромагнитный метод определения глубины залегания дефекта 615
Овчинникова Ю. В., *Усольцев В. П.* Особенности лазерного гравирования изделий из оргстекла 623
Остроух Ю. А., *Зонов Р. Г.*, *Михеев Г. М.* Одночастотный лазер для исследования нелинейно-оптических эффектов в широком спектральном диапазоне 628

Печина Е. А., *Данилова Е. С.*, *Орлова Н. А.* Применение метода регистрации момента кручения для изучения механосплавления в системе Cu-Zn в процессе мегапластической деформации 638
Усольцев А. В. Аппаратно-программный комплекс роста спортивных результатов на основе применения лазерного излучения 647
Усольцев В. П., *Уразманова О. И.* Расширение функциональных возможностей систем анализа изменения оптической неоднородности жидких сред 653
Усольцева А. В. Виртуальная система лазерной обработки анизотропных материалов 656
Хуснутдинов Э. М., *Кривенков Р. Ю.*, *Михеев К. Г.*, *Булатов Д. Л.*, *Михеев Г. М.* Устройство для исследования нелинейно-оптических свойств суспензий наноматериалов при повышенных температурах 661

Секция 6. **Алгоритмы и программные системы для приборостроения**

Айзикович А. А., *Возмищева Т. Г.*, *Демаков Ю. П.* Технологии обучения иностранных студентов дисциплинам математики и информатики в техническом университете 668
Айзикович А. А., *Демаков Ю. П.*, *Лучихина Е. А.* Реализация дельта-модуляции сигналов 674
Бимаков Е. В. Применение метода виртуального зондирования для решения задач технического зрения 678
Дизендорф К. И. База данных комплексной оценки безопасности – механизм мониторинга состояния опасного объекта 690
Злобина А. Г., *Немцова О. М.* Визуализация данных малоглубинной электроразведки и моделирование 3D-границ погребенного объекта 694
Мокрова С. М., *Милич В. Н.* Компьютерный метод определения анизотропии по неполным прямым полюсным фигурам 700
Назмутдинова А. И., *Милич В. Н.* Системный анализ задачи интерпретации космических снимков площадных объектов местности 707

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

УДК 621.372, 621.373

Р. Р. Ахметгалиев, магистрант
Л. О. Долгачева, магистрант
П. А. Ушаков, доктор технических наук, профессор
E-mail: ahmetgaliev@list.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Исследование характеристик мультивибратора дробного порядка

Дано понятие об элементах с фрактальным импедансом, синтезированы ЭФИ на основе однородных RCGNR-линий в программе «Программа синтеза RCGNR-структур», созданной на кафедре «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры», созданы схемотехнические модели ЭФИ в программе LTspice, проведены расчеты параметров ЭФИ, промоделированы схемы мультивибратора дробного порядка.

Ключевые слова: мультивибратор дробного порядка; элементы с фрактальным импедансом; схемотехническое моделирование в программе LTspice

Современный язык описания природы широко использует теорию дробного исчисления и теорию фракталов, т. к. в реальности не существует объектов евклидовой геометрии и процессов, описываемых дифференциальными уравнениями целого порядка. Поэтому и радиоэлектроника не может обойтись без новой элементной базы – элементов с фрактальным импедансом (ЭФИ). Основной количественной характеристикой таких элементов является фрактальный импеданс [1], который определяется по формуле

$$\left(j\omega\right) = \frac{1}{\left(j\omega\right)^{\alpha} C^{\alpha}} = \left|Z_F\right| e^{j\omega} = \frac{1}{\omega^{\alpha} C^{\alpha}} e^{-j\alpha\frac{\pi}{2}}, \qquad (1)$$

© Ахметгалиев Р. Р., Долгачева Л. О., Ушаков П. А., 2017

где $|Z_F|$ – модуль импеданса, Ом; C^{α} – коэффициент пропорциональности, Ом$^{-1}\times$с$^{-\alpha}$; ω – круговая частота, Гц; α – дробный показатель степени.

Наличие таких элементов позволяет реализовать операции интегрирования/дифференцирования дробного порядка в системах генерации и обработки фрактальных сигналов, идентификацию и обработку сигналов, физическое моделирование процессов, анализ и прогнозирование эксплуатационных характеристик радиокомпонентов и многое другое [2]. Особый интерес вызывает использование ЭФИ в схемах импульсных генераторов, таких как мультивибратор. Состоит это устройство в основном из операционного усилителя, конденсатора и резисторов [3].

Целью данной работы является исследование характеристик мультивибратора дробного порядка при использовании ЭФИ.

В настоящее время существуют различные конструктивно-технологические варианты ЭФИ. Одним из таких вариантов является ЭФИ на основе однородных *RCGNR*-линий [4]. Синтез таких фрактальных элементов проводился с помощью программы «Программа синтеза *RCGNR*-структур», созданной на кафедре «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры» (рис. 1).

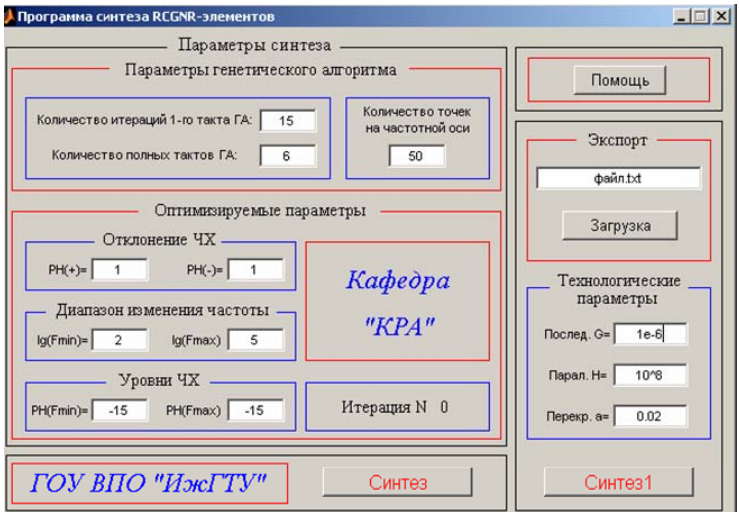


Рис. 1. Интерфейс программы синтеза *R-CG-NR*-структур

Результатом синтеза является схема включения, параметры *RCGNR*-линий (рис. 2) и ФЧХ входного импеданса (рис. 3).

Для создания, моделирования и расчета схем с RC-ЭРП элементами мы использовали программу *LTspice*, которая по сравнению с другими программами:

1) является бесплатной;

2) легка в освоении, и по ней можно найти много материала и библиотек в интернете;

3) все описания схем и библиотек элементов происходят на понятном языке *Spice*;

4) универсальна, потому что можно самому создавать библиотеки;

5) позволяет измерять токи и напряжения в любой точке схемы;

6) директивы и параметры симулятора помещаются прямо на схеме;

7) большая скорость моделирования [5].

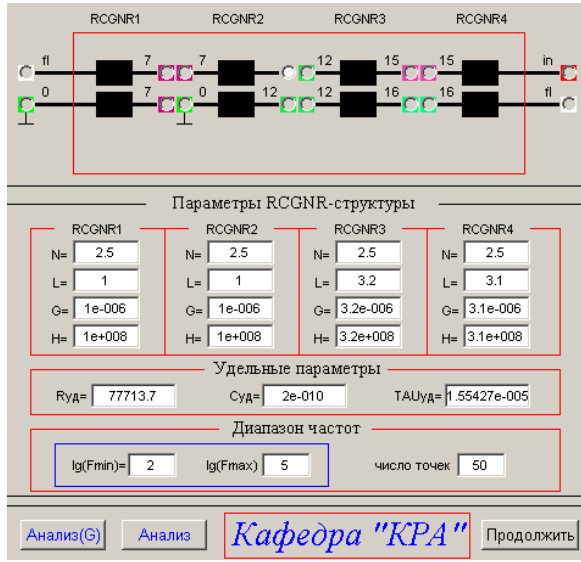


Рис. 2. Топология и параметры R-CG-NR-структур

Схема включения и параметры *RCGNR*-линий, составляющих синтезированный ЭФИ, созданная в программе *LTspice*, представлены на рис. 4. Здесь КРЭ – двумерный конечный распределенный элемент, состоящий из длинных линий, которые в программе *LTspice* моделируются лестничными *RC*-цепями (рис. 5).

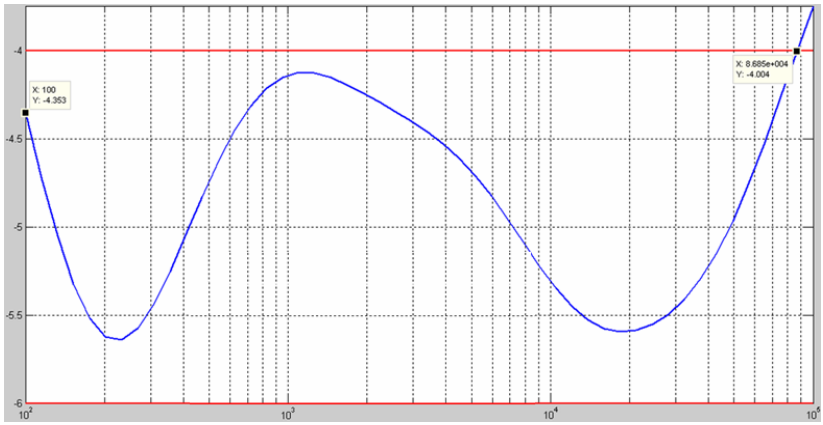


Рис. 3. ФЧХ входного импеданса *R-CG-NR*-структуры

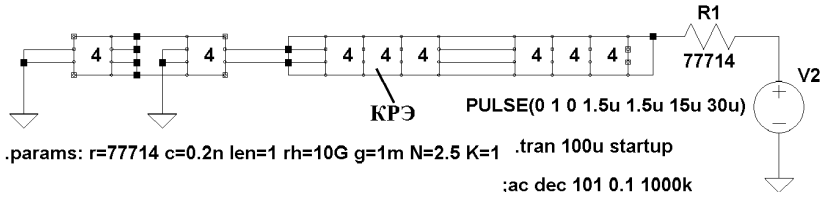


Рис. 4. Схема, созданная в программе *LTspice*

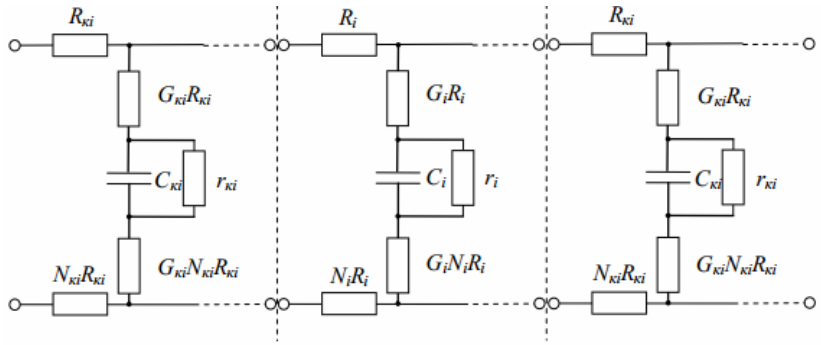


Рис. 5. Схема замещения КРЭ

Измеренная ФЧХ импеданса модели ЭФИ изображена на рис. 6.

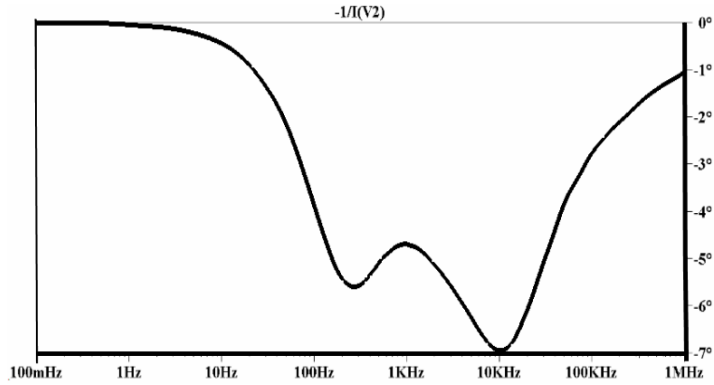


Рис. 6. ФЧХ входного импеданса схемы

Видим, что ФЧХ входного импеданса схемы, построенной в программе *LTspice* (рис. 4), соответствует ФЧХ, полученной на основе аналитической модели ЭФИ (рис. 3). Используя выражение (1), найдены основные параметры схемотехнической модели ЭФИ: $|Z_F|$ = 445 кОм; C_α = 1,15×10^{-6} Ом$^{-1}$с$^{-0,055}$; α = 0,055.

Схема мультивибратора дробного порядка, полученная заменой конденсатора в классической схеме на созданную нами ЭФИ, изображена на рис. 7.

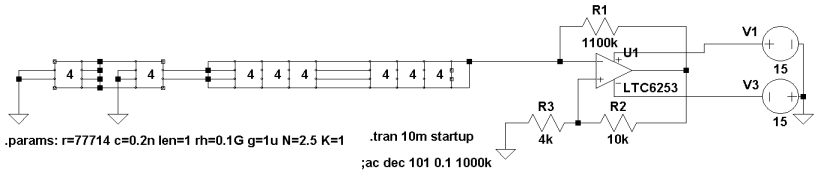


Рис. 7. Мультивибратор дробного порядка

Изменяя сопротивление резистора R1, мы проанализировали, как изменяется частота на выходе мультивибратора. По полученным данным на рис. 8 представлен график, по которому видно, что при увеличении сопротивления частота падает по экспоненциальному закону.

В то же время аналогичная зависимость для классической схемы мультивибратора с обычным конденсатором представляет собой прямую линию (рис. 9).

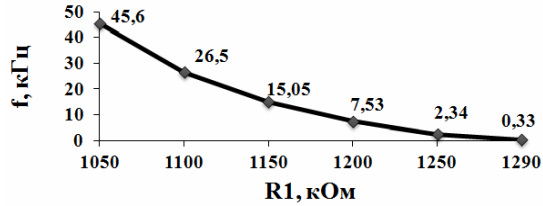


Рис. 8. График зависимости частоты на выходе дробного мультивибратора от сопротивления резистора

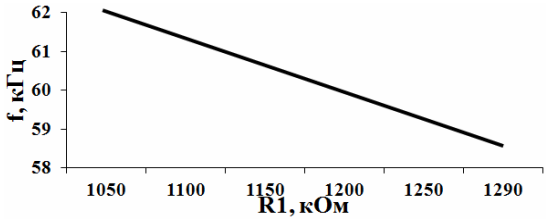


Рис. 9. График зависимости частоты на выходе мультивибратора от сопротивления резистора

На рис. 10–12 изображены зависимости частоты мультивибратора дробного порядка для различных значений показателя α и различных конструкций ЭФИ.

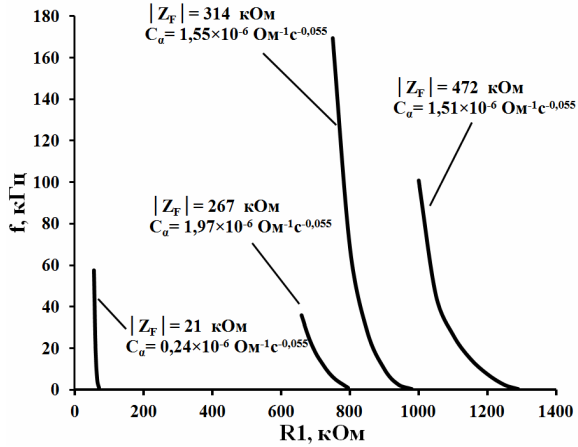


Рис. 10. График зависимости частоты от сопротивления при α = 0,055

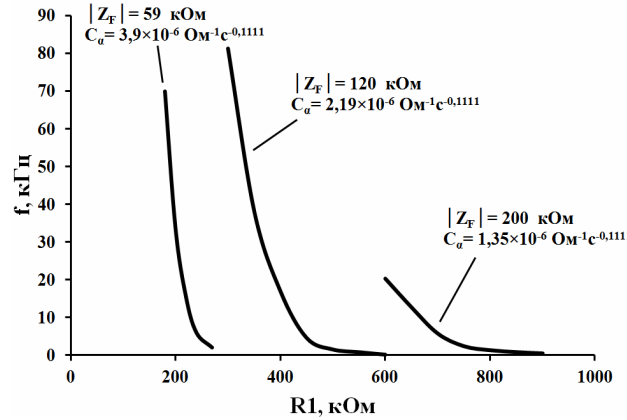


Рис. 11. График зависимости частоты от сопротивления при $\alpha = 0{,}1111$

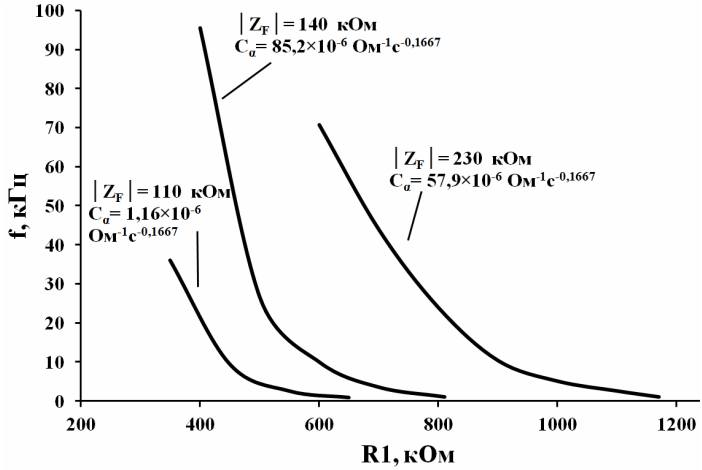


Рис. 12. График зависимости частоты от сопротивления при $\alpha = 0{,}1667$

Проанализировав эти зависимости, можно сделать вывод, что условия самовозбуждения мультивибратора дробного порядка зависят от параметров ЭФИ.

Для установления условий самовозбуждения мультивибратора дробного порядка необходимо решать дифференциальное уравнение дробного порядка состояния цепи, содержащей ЭФИ и резистор R1, которое имеет следующий вид:

$$\frac{d^{\alpha}q}{dt^{\alpha}}+\frac{1}{\tau_{\alpha}}q(t)=\frac{C}{\tau_{\alpha}}\vartheta(t). \qquad (2)$$

Вывод

В ходе проделанной работы было показано, что характеристики мультивибратора дробного порядка заметно отличаются от характеристик «классического» мультивибратора. Поэтому для проектирования мультивибраторов дробного порядка необходимо решение дифференциального уравнения дробного порядка, описывающего процессы его работы.

Список литературы

1. *Потапов*, *А. А.* Фрактальные элементы и радиосистемы. Физические аспекты / А. А. Потапов, А. Х. Гильмутдинов, П. А. Ушаков. – М. : Радиотехника, 2009. – 200 с.

2. *Гильмутдинов*, *А. Х.* Резистивно-емкостные элементы с распределенными параметрами: Анализ, синтез и применение. – Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. – 350 с.

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

4. Разработка генетического алгоритма для синтеза конструкций фрактальных элементов на основе резистивно-емкостной среды со структурой слоев вида *R-C-NR* / П. А. Ушаков, К. О Максимов // Вестник ИжГТУ. – 2012. – № 3. – С. 104–108.

5. *Володин*, *В. Я.* LTspice: компьютерное моделирование электронных схем. – СПб. : БХВ-Петербург, 2010. – 400 с.

6. *Сохор*, *Ю. Н.* Моделирование устройств в пакете LTspice/SwCAD: учеб.-метод. пособие. – Псков : ППИ, 2008. – 167 с.

7. *Ушаков*, *П. А.* Проектирование функциональных устройств микроэлектроники на основе резистивно-емкостных сред : учеб. пособие. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2012. – 160 с.

8. *Гильмутдинов*, *А. Х.* Резистивно-емкостные элементы с распределенными параметрами: анализ, синтез и применение. – Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. – 350 с.

9. *Ушаков*, *П. А.* Анализ электрических сигналов и цепей : учеб. пособие. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2003. – 152 с.

10. *Попов*, *В. П.* Основы теории цепей. – М. : Высш. шк., 1985. – 496 с.

Study of the Characteristics of the Multivibrator Fractional Order

In this report was given a basic definition about fractional order impedance components, was synthesized FOIC by RCGNR-lines in program "Synthesis pro-

gram of RCGNR structures", which was created in department of engineering of electronic equipment. The article presents schematic models of FOIC in LTspice program. FOIC parameters were calculated and fractional order flip-flop scheme was simulated.

Keywords: fractional order multivibrator; fractional order impedance components; general-circuit simulation in LTspice program.

УДК 621.3.076.7

Г. Д. Бабошкин, аспирант
E-mail: baboshanchik@rambler.ru
С. Г. Дулесов, инженер
А. А. Бабошкина, магистрант
П. А. Ушаков, доктор технических наук, профессор кафедры «КРА»
E-mail: ushpet@izh.com
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Особенности проектирования и преимущества цифровых и аналоговых ПИД-регуляторов

В статье представлен сравнительный анализ схем цифровых и аналоговых ПИД-регуляторов. Произведен анализ параметров операционных усилителей, влияющих на параметры ПИД-регулятора. Представлена программа реализации цифрового ПИД-регулятора на языке С. Сделан общий вывод о сферах применения анализируемых схем.

Ключевые слова: ПИД-регулятор; система автоматического управления; переходная характеристика; системы реального времени

Современные автоматизированные изделия выполняют различные функции, начиная от систем типа «умный дом» и заканчивая стабилизацией положения крупногабаритных объектов. Для различных целей требования для системы управления различны, однако классическая структура построения САУ едина (рис. 1).

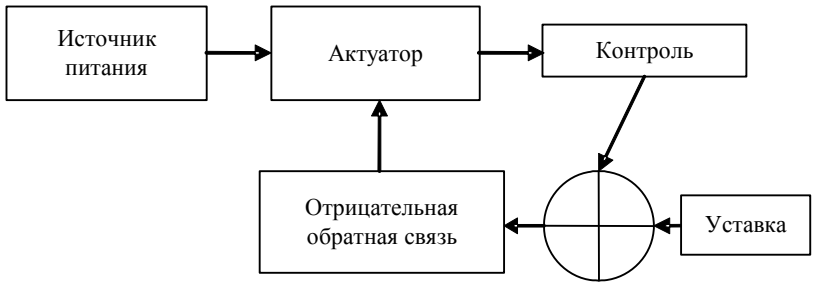


Рис. 1. Структурная схема САУ

© Бабошкин Г. Д., Дулесов С. Г., Бабошкина А. А., Ушаков П. А., 2017

Цель САУ – стабилизировать выходной параметр, сравниваемый с уставкой. При несоответствии выходного параметра уставке срабатывает отрицательная обратная связь, оказывающая дополнительное воздействие на объект управления, приводящее его к необходимому режиму работы.

Таким образом, основной задачей проектирования САУ является расчет цепи отрицательной обратной связи (ЦООС) таким образом, чтобы минимизировать время и ошибку управления системы.

Различные варианты схемотехнических решений ЦООС созданы для различных систем управления. Наиболее широкое распространение получил ПИД-регулятор, отрабатывающий сразу три вида ошибок: пропорциональную, статическую и случайную [1].

Основные параметры ПИД-регулятора:

1. Постоянная дифференцирования $T_д$ (коэффициент дифференцирования $K_д$): $T_д = \frac{1}{K_д}$;

2. Постоянная интегрирования $T_и$ (коэффициент интегрирования $K_и$): $T_и = \frac{1}{K_и}$;

3. Коэффициент пропорциональности $K_п$.

Существует две схемы реализации ПИД-регулятора: аналоговая и цифровая. Однако не везде, где можно применить аналоговый ПИД-регулятор, можно применить цифровой, и наоборот.

Рассмотрим причины, по которым это происходит. Для этого необходимо проанализировать, что задает характеристики того или иного регулятора.

Классическая схема аналогового ПИД-регулятора на рис. 2 [1].

Как видно на рис. 2, звенья ПИД-регулятора строятся на операционных усилителях и элементов задающих характер звена и коэффициент его регулирования. Соответственно, для интегрирующего звена в цепи обратной связи усилителя будет находиться интегрирующая цепь (на рис. 2 ОУ DA3 и цепь C2-R3), а для дифференцирующего звена – дифференцирующая цепь (DA1-C1-R5). В цепи регулятора для суммирования выходных сигналов звеньев используется ОУ DA4.

Параметры (1), (2), и (3) характеризуют частотные характеристики того или иного звена. Однако следует отметить, что частотные характеристики цепей звеньев регулятора могут быть ограничены частотной характеристикой применяемого в них ОУ.

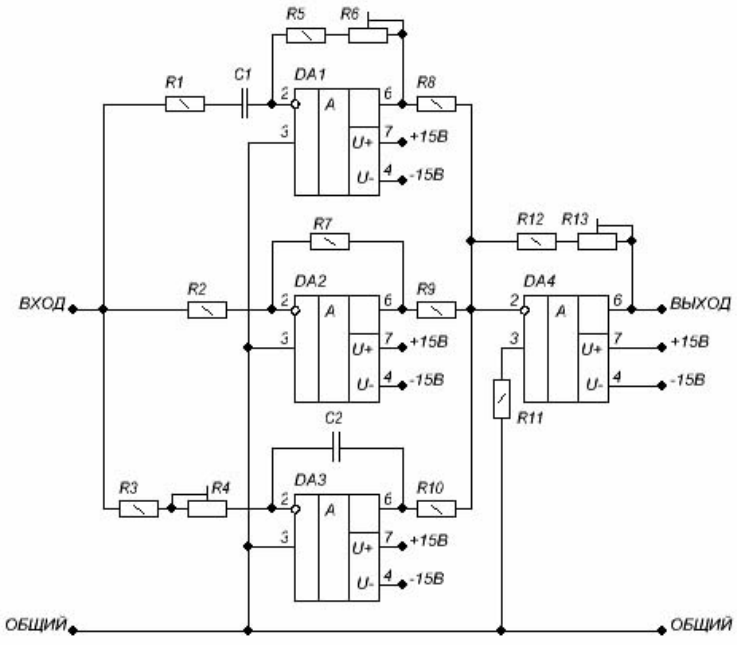


Рис. 2. Классическая схема аналогового ПИД-регулятора

В этом случае параметры ПИД-регулятора определяются как:

$$K_{\text{д}} = \left(R5 + R6\right) \cdot C1; \tag{1}$$

$$K_{\text{и}} = \frac{1}{\left(R3 + R4\right) \cdot C2}; \tag{2}$$

$$K_{\text{п}} = \frac{R7}{R2}. \tag{3}$$

Как видно из рис. 3, амплитудо-частотная характеристика ОУ имеет убывающий характер с ростом частоты. Таким образом, неправильный выбор ОУ может сильно снизить коэффициент передачи одного из управляющих звеньев.

Современные ОУ обеспечивают постоянный коэффициент усиления в частотах от 0 до 16 МГц, что покрывает широкий функциональный диапазон САУ [2]

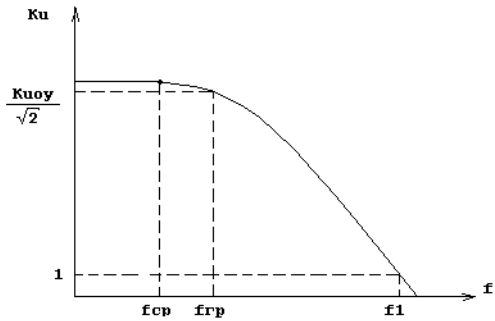


Рис. 3. АЧХ ОУ

Наиболее важным параметром является внутренний дрейф ОУ, вызванный температурным режимом работы и низким запасом по фазе собранной на его основе цепи. Излишние колебания в выходных цепях звеньев регулятора могут увеличить статическую ошибку системы в целом.

Поэтому при проектировании ПИД-регулятора необходимо соблюдать условие оптимального запаса по фазе системы равного от 45 до 60° каждого звена.

Помимо частотных характеристик, при выборе ОУ необходимо учесть собственные динамические характеристики ОУ (рис. 4).

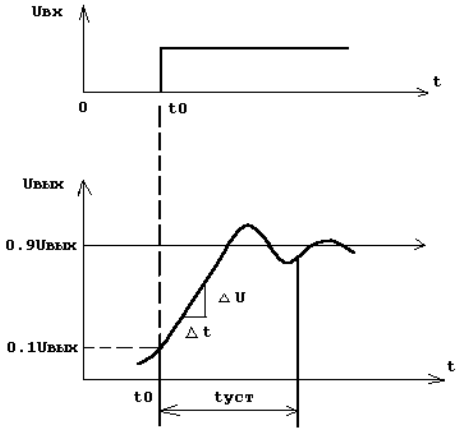


Рис. 4. Динамические характеристики ОУ

Основной целью САУ является минимизация времени управления объектом. Таким образом, чем быстрее ОУ реагирует на входное воздействие, тем быстрее объект начнет компенсировать ошибку.

Следует отметить: чтобы избежать перерегулирования САУ, необходимо выбирать динамические характеристики ОУ, отталкиваясь от переходной характеристики самого объекта и требуемых характеристик САУ.

На сегодняшний день, выбор ОУ настолько велик, что при достаточном опыте в проектировании ПИД-регуляторов можно подобрать ОУ с параметрами, удовлетворяющими требуемой САУ.

Задачей проектирования цифрового ПИД-регулятора, в первую очередь, является выбор времени дискретизации входного аналогового сигнала. Поскольку оперирующим устройством в цепи обратной связи является микроконтроллер или микропроцессор, необходимо оцифровать сигнал ошибки датчиков [3]. Таким образом, в процессе аналого-цифрового преобразования и вычисления необходимых операций может появиться нежелательная задержка между появлением сигнала ошибки и результатом на выходе ПИД-регулятора, снижающая запас по фазе схемы.

Исходя из вышеперечисленного необходимо выбрать минимально возможное время дискретизации, чтобы минимизировать возможную статическую ошибку САУ. Помимо этого, необходимо на входе АЦП ставить фильтр, снижающий влияние высокочастотных шумов сигнала ошибки [3]. Это связано с тем, что при дискретизации аналогового сигнала основная информация переходит в область высоких частот, что, при наличии высокочастотных шумов в аналоговом сигнале, может вызвать появление алиасного эффекта [4], т. е. появление лишней информации в спектре полезного сигнала. Современные микроконтроллеры позволяют реализовать все вышеперечисленные функциональные узлы, поэтому с точки зрения конструкции цепь «фильтр – АЦП – ПИД-регулятор» может быть реализована на одной микросхеме.

Минимально возможное время дискретизации определяется выбором оперирующего устройства и способом реализации программы ПИД-регулятора на нем. Необходимо учитывать тактовую частоту работы микроконтроллера (МК). Частота дискретизации не может быть больше частоты МК и АЦП, более того, она выбирается приблизительно равной частоте выполнения всех операций ПИД-регулятора.

Самый простой способ реализации программы ПИД-регулятора выглядит следующим образом [5]:

```
static signed int last_error;
signed int P;
signed int D;
static signed int I;
signed int PID;
P = (setpoint - currentpoint);
I = (I + (setpoint - currentpoint) * INTERVAL);
D = (((setpoint - currentpoint) - last_error) / INTERVAL);
last_error = setpoint - currentpoint;
PID = (Kp * P) + (Ki * I) + (Kd * D);
return (PID);
```

Для большинства современных микроконтроллеров сложные операции (типа суммирования и вычитания) выполняются в 4 такта работы процессора [6]. Таким образом, один цикл данной программы при частоте работы процессора 16 МГц будет выполняться за 3,375 мкс (54 такта). Выбор времени дискретизации меньше этой величины может привести к потере информационного сигнала.

Конечно, существуют более быстрые алгоритмы для реализации операций регулирования, позволяющие снизить время преобразования сигнала ошибки. Однако, в любом случае, применение цифровой схемы вносит весомую задержку в цикл работы схемы, снижая ее стабильность.

Цифровые ПИД-регуляторы достаточно просты в проектировании, многофункциональны (присутствует возможность реализовать автоподстройку коэффициентов регулирования), гибкие для регулирования. Однако с учетом вышеперечисленного они не подходят для САУ реального времени и обладают более низким запасом стабильности.

Анализируя все вышесказанное об особенностях проектирования цифровых и аналоговых ПИД-регуляторов, можно сделать вывод о том, что при необходимости реализовать систему, обладающую высокой точностью, лучше использовать классическую аналоговую схему, а для более простых схем, не требующих высокой точности регулирования, лучше применить цифровую схему ПИД-регулирования, ввиду простоты ее реализации и дешевизны.

Список литературы

1. *Ротач*, *В. Я.* Теория автоматического управления. – М. : МЭИ, 2004. – 400 с.

2. Amplifier and Standard Linear Selection Guide [Электронный ресурс] // Analog Devices. – URL: http://www.analog.com/ru/products/landing-pages/001/amp-std-linerar-selection-guide.html (дата обращения: 06.02.2017).

3. *Сергиенко*, *А. Б.* Цифровая обработка сигналов. – СПб. : Питер, 2002. – 608 с.

4. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования / Ш. Е. Штейнберг, Л. П. Сережин, И. Е. Залуцкий, И. Г. Варламов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – № 7. – С. 1–7.

5. MCS-51. ПИД-регулятор [Электронный ресурс] // Микроконтроллеры. – URL: http://www.cyberforum.ru/microcontrollers/thread1023043.html (дата обращения: 06.02.2017).

Designing Features and Advantages of Digital and Analog PID-Controllers

The article presents the comparative analysis of analog and digital PID controllers, the analysis of operational amplifiers parameters influencing the parameters of the PID controller. The program for implementation of digital PID controller in the C language is presented. The general conclusion on applications of the analyzed schemes is formulated.

Keywords: PID controller; automatic control system; transient characteristics; real-time systems

УДК 629.78

В. Н. Белослудцев, студент
Е. С. Бояринцева, студентка
А. В. Драчев, студент
С. А. Рылов, студент
В. Н. Широбоков, студент
В. А. Глушков, кандидат технических наук, доцент кафедры «КРА»
E-mail: vladimir.glushkov@gmail.com
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
К. А. Богатырев, инженер
С. А. Широких, инженер
E-mail: GL@idz.ru
ОАО «ИРЗ», г. Ижевск

Обзор миссий некоторых университетских спутников

Приводится описание миссий некоторых спутников, созданных студентами университетов по всему миру.

Ключевые слова: Cubesat; наноспутник; искусственный спутник; миссия

Введение

В настоящее время в области космического приборостроения активно развивается направление создания студенческих наноспутников, наша цель показать их эффективность и спектр задач которые они могут решать [1].

Миссии

TUBSAT-N – спутник, созданный в Берлинском техническом университете. Запущен 7 июля 1998 года [2].

Миссия заключается в следующем:

– демонстрация недорогого доступа в космос без снижения производительности;

– двунаправленная передача данных между автономными экологическими станциями и спутниками;

– отслеживание средних и крупных млекопитающих;

– деактивация украденных авто.

CUTE-I (*Cubical Tokyo Tech Engineering Satellite-I*) – спутник Токийского института технологий. Запущен 30 марта 2003 года [3].

© Белослудцев В. Н., Бояринцева Е. С., Драчев А. В., Рылов С. А., Широбоков В. Н., Глушков В. А., Богатырев К. А., Широких С. А., 2017

Миссия заключается в следующем:

– передача *CW*- и *FM*-сигналов; передача данных по двум разным протоколам;

– поворот солнечных батарей по команде связи;

– мониторниг и контроль всех бортовых датчиков, таких как: термометры, акселерометры, гироскопы и т. д.

UWE-1 – спутник, созданный в Университете Вюрцбурга. Запущен 27 октября 2005 года [4].

Миссия заключается в следующем:

– проанализировать методы передачи информации по протоколу *TCP/IP* для телеметрии и дистанционного управления данных, принимая во внимание типичные проблемы, такие как задержки и сбои;

– реализация наземной станции и ее включение в международную сеть *Cubesat* пользователей через интернет;

– окончательное тестирование системы на определение положения (гироскоп, определение отклонения).

AAUSAT – датский спутник созданный студентами Ольборского университета. Запущен 28 апреля 2008 года [5].

Миссия заключается в следующем:

– спроектировать и проверить работоспособность автоматизированной системы диспетчерского управления, позволяющей остановить беспорядочное движение спутника, а также позволяющей с помощью команд с земли управлять положением спутника в пространстве;

– с помощью детектора гамма излучения обнаружить гамма всплески из космоса.

PharmaSat 1 – спутник, созданный в университете Санта-Клара США при поддержке *NASA Ames Small Spacecraft Division* [6].

Миссия заключается в следующем:

– узнать больше о действии лекарств в космосе, изучить, как дрожжи реагируют на противогрибковое лечение;

– для этого *PharmaSat* содержит в себе микролаборатории, оснащенные датчиками и оптическими системами, позволяющими определить рост, плотность и здоровье дрожжевых клеток, а также системы, позволяющие контролировать температуру, обеспечивать питание и введение препаратов.

KSat создан в Японии в университете Кагосима. Запущен 20 мая 2010 года [7].

Миссия заключается в следующем:

– научиться прогнозировать ливни и торнадо – орбитальный метод наблюдения за атмосферными водяными парами; используется радиочастотный детектор паров воды;

– базовый эксперимент для низкоорбитальных спутников – частотно фазовая синхронизация наземной станции и спутника;

– получение фотографий земли и передача их по высокоскоростному каналу связи;

– испытание специально спроектированной развёртываемой антенны.

Explorer-1 HRBE – создан университетом штата Монтана, США [8].

Миссия *HRBE* состоит в том, чтобы обнаружить радиационный пояс земли и определять его характеристики. Миниатюрный счетчик Гейгера позволяет измерить интенсивность и изменчивость высокоэнергетических электронов с низкой околоземной орбиты.

MaSat-1 – первый венгерский искусственный спутник Земли. Запущен 13 февраля 2012 года [9].

Миссия заключается в следующем:

– постройка надежной энергетической системы для спутника, состоящей из шести независимых высокоэффективных элементов питания;

– тестирование новой системы коммуникации на базе единого чипа *ISM*-частоты;

– постройка надежного бортового компьютера и системы сбора данных, способной регистрировать, собирать, сжимать и передавать телеметрическую информацию на нескольких каналах связи;

– создание полуактивной системы ориентации на двух постоянных магнитах;

– тестирование алгоритма стабилизации;

– испытание аналоговых датчиков солнечной ориентации на основе инфракрасных детекторов;

– слежение за высотой аппарата с помощью 3-осного гироскопа, 3-осного магнитометра и 3-осного акселерометра.

Goliat – румынский спутник, созданный студентами Будапештского университета. Запущен 13 февраля 2012 года [10].

Миссия заключается в следующем:

– измерение суммарной дозы излучения внутри спутника (*DOSE-N* – сцинтилляционный счётчик);

– наблюдения Земли, в частности, территории Румынии (*CICLOP* – 3 мегапиксельная цифровая камера);

– изучение воздействия микрометеоритов и измерения их кинетической энергии, чтобы оценить их количество и скорость; данные о каждом ударе будут обрабатываться на наземной станции (*SAMIS*-датчик).

PW-sat – первый польский искусственный спутник земли, разработанный Варшавским политехническим институтом при поддержке Центра космических исследований Польской академии наук. Запущен 13 февраля 2012 года [11].

Миссия заключается в следующем:

– испытание гибких фотоэлементов на гибкой основе (солнечные батареи);

– разработка системы схода спутника с орбиты с последующим сгоранием в атмосфере (деорбитация);

– передача телеметрических данных.

E-st@r – итальянский ИСЗ, разработанный Туринским политехническим университетом. Запущен 13 февраля 2012 года [12].

Миссия заключается в следующем:

– подготовка специалистов в области аэрокосмической промышленности;

– изучение технологий для удешевления стоимости бюджетных спутников;

– разработка и тестирование активной системы контроля и определения ориентации (*ADCS*).

– проверка коммерческих компонентов и материалов.

Xatcobeo – испанский спутник, созданный в университете Виго. Запущен 13 февраля 2012 года [13].

Миссия заключается в следующем:

– проверка новой системы измерения количества ионизирующего излучения (*RDS*);

– разработка нового программного обеспечения для реконфигурируемых радиосистем (*SRAD*);

– экспериментальная система развертывания солнечных батарей (*PDM*);

– получение студентами знаний и опыта.

Томск-ТПУ-120 – российский спутник, запущенный в мае 2016 года в честь 120-летия Томского политехнического университета, разработчика данного аппарата [14].

Цели запуска следующие:

– испытание новых материалов для космической отрасли;

– испытание прочности и надежности первого корпуса спутника, изготовленного на 3D-принтере;

– проверка возможности запуска спутника без дополнительных устройств – запуск был произведен человеком вручную при выходе из МКС в открытый космос.

RAVAN – американский спутник, разработанный в лаборатории прикладной физики Университета Джонса Хопкинса. Запущен 11 ноября 2016 года [15].

Миссия данного спутника:

– измерение абсолютной величины радиационного дисбаланса планеты;

– демонстрация новой технологии – радиометра со светопоглощающим элементом из углеродных нанотрубок;

– предоставление ученым значимой информации для исследования климата Земли.

INSPIRE – спутник, созданный при участии таких американских учебных заведений, как Массачусетский технологический институт и Калифорнийский университет. Запуск запланирован на 2017 год [16].

Среди миссий, преследуемых разработчиками, можно выделить следующие:

– демонстрация работы навигационных и телекоммуникационных систем в условиях глубокого космоса;

– реализация последовательной передачи данных путем ретрансляции от спутника к спутнику, на Землю и в обратном направлении;

– демонстрация возможности перепрограммирования и поддержания систем обработки данных в рабочем состоянии за счет их мониторинга и перезагрузки в случае необходимости.

Лунный фонарь – это новая концепция миссии, в которой планируется запустить *CubeSat* на Южный полюс Луны. Это будет первый *CubeSat*, вращающийся на орбите Луны. Южный полюс Луны вызывает особый интерес из-за наличия на нем постоянно затемненных областей, содержащих лед [17].

Цель наноспутника – определить наличие или отсутствие воды, его физическое состояние. Космический аппарат будет маневрировать на лунной полярной орбите, а установленный на спутнике лазер излучать луч. Отраженный от поверхности Луны луч анализируется инфракрас-

ным спектрометром. Космический аппарат планируют запустить в ноябре 2018 года.

Кубсат Омотэнаси – лунная миссия разработана совместно Японским агентством аэрокосмических исследований (*JAXA*) и Университетом Токио. Планируется выпустить 1 кг лунного посадочного модуля с надувными подушками безопасности, для изучения лунной поверхности и измерения радиационной обстановки. Космический аппарат планируют запустить в 2018 году.

SWIMSat – это 6-юнитовый *CubeSat* для мониторинга корональных выбросов массы (КВМ) и метеоритов, разработанный техническим университетом штата Аризона [19]. *SWIMSat* будет расположен на геостационарной орбите. Появление *CubeSat* и ряд технологий для космоса представляет возможность начать сейчас, в рамках университетской программы наноспутников, обеспечения безопасности околоземного космического пространства. *SWIMSat* будет оснащен корнографом для наблюдения солнечной короны и инфракрасной камерой для обнаружения крупных метеоритов. Космический аппарат планируют запустить в 2021 году.

Выводы

Таким образом, разработка наноспутника обеспечивает подготовку специалистов в области космического приборостроения и способствует решению широкого спектра задач от пропаганды до прикладных и научных исследований, а также позволяет решать проблемы в области микроэлектроники, спутниковой телеметрии и телекоммуникации, экологии, биологии и других. Способствует развитию технологии и конструкторских решений в области космического приборостроения.

Список литературы

1. Nanosatellite & CubeSat Database. – URL: http://www.nanosats.eu (дата обращения: 10.10.2016).

2. TUBSAT (Technical University of Berlin Satellite) Program // Earth observation portal. – URL: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/tubsat (дата обращения: 10.11.2016).

3. CUTE-I (Cubical Tokyo Tech Engineering Satellite-I) // Earth observation portal. – URL: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cute-i (дата обращения: 10.11.2016).

4. UWE-1 (Universität Würzburg's Experimentalsatellit-1) // Earth observation portal. – URL: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/u/uwe-1 (дата обращения: 10.11.2016).

5. AAUSat-2 (Aalborg University CubeSat-2) // Earth observation portal. – URL: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/aausat-2 (дата обращения: 10.10.2016).

6. PharmaSat Nanosatellite // National Aeronautics and Space Administration. – URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/smallsats/pharmasat/main/index.html (дата обращения: 10.10.2016).

7. Ksat 2 // Gunter's Space Page. – URL: http://space.skyrocket.de/doc_sdat/ksat-2.htm (дата обращения: 10.10.2016).

8. Hiscock Radiation Belt Explorer (HRBE) // Montana State University. – URL: https://ssel.montana.edu/e1p.html (дата обращения: 10.10.2016).

9. MaSat-1 // MaSat-1. – URL: http://cubesat.bme.hu/en/projektek/masat-1/ (дата обращения: 10.11.2016).

10. Goliat // Goliat. – URL: http://www.goliat.ro/index.php/mission1 (дата обращения: 10.11.2016).

11. PW-Sat // PW*sat2 polski satelita studencki. – URL: http://pw-sat.pl/en/mission/ (дата обращения: 10.11.2016).

12. E-st@r // CubeSat polito team. – URL: http://areeweb.polito.it/cubesat-team/missions/e-star-i/ (дата обращения: 10.11.2016).

13. Xatcobeo // Xatcobeo. – URL: https://www.xatcobeo.com/cms/index.php?option=com_content&view=article&id=2&Itemid=3 (дата обращения: 10.11.2016).

14. Спутник «Томск-ТПУ-120» // Служба новостей. Томс. политехн. ун-т. – URL: http://news.tpu.ru/news/2016/05/05/25231/ (дата обращения: 20.11.2016).

15. RAVAN // Earth observation portal. – URL: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/r/ravan (дата обращения: 20.11.2016).

16. INSPIRE // Earth observation portal. – URL: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/inspire (дата обращения: 20.11.2016).

17. Lunar Flashlight // Jet Propulsion Laboratory. – URL: http://www.jpl.nasa.gov/cubesat/missions/lunar_flashlight.php (дата обращения: 10.11.2016).

18. International Partners Provide Science Satellites for America’s Space Launch System Maiden Flight // National Aeronautics and Space Administration. – URL: https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/international-partners-provide-cubesats-for-sls-maiden-flight/ (дата обращения: 10.11.2016).

19. SWIMSat: Space Weather and Meteor Impact Monitoring using a Low-Cost 6U CubeSat / V. Hernandez, P. Gankidi, A. Chandra, A. Miller, P. Scowen, et al. // Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, CubeSat Session VIII: Instrument/Science Missions, 2016. – Pp. 1–6. – URL: http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3442&context=smallsat (дата обращения: 10.11.2016).

Some University Satellites Missions Overview

Missions of some satellites made by university students all over the world are overviewed.

Keywords: Cubesat; nanosatellite; artificial satellite; mission

УДК 620.17:658.56

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

Исследование возможности отбраковки танталовых конденсаторов по напряжению пробоя танталового порошка анодной поверхности

С помощью экспериментальных методов и на основе аналитических данных произведен анализ результатов изготовления конденсаторов с различными значениями пробивного напряжения танталового порошка анодной поверхности конденсатора путем оценки таких параметров, как ток утечки, тангенс угла диэлектрических потерь и выход годных готовых конденсаторов.

Ключевые слова: электролитический танталовый жидкостной конденсатор; надежность; напряжение пробоя

Введение

Одной из характеристик качества и надежности конденсатора является его электрическая прочность, потеря (или ухудшение) которой называется *деградацией*. Анализируя теоретические и практические данные исследований зарубежных и российских ученых, представленные в литературе [1–24], на процесс деградации цельнотанталовых жидкостных конденсаторов влияют различные факторы, например, такие как тепловое воздействие, электрический или электрохимический факторы, механические и химические загрязнения (примеси) в применяемых материалах и др.

Конструкция и качество изготовления анода является чрезвычайно важной на этапе формирования электролитического танталового конденсатора. Как известно, анод для всех типов танталовых конденсаторов с жидким электролитом изготовляют посредством прессования анодной таблетки из танталового порошка конденсаторного класса с определенным зарядом и последующего ее спекания, как правило, при температуре от 1200 до 2050 °С в зависимости от заряда порошка. Формирование слоя диэлектрика на аноде, пентоксида тантала получают методом погружения спеченного танталового анода в ванну со слабым раствором кислоты с последующей подачей напряжения оксидирования выше номинального (рабочего) напряжения конденсатора.

© Беляева Е. А., 2017

В результате оксидирования диэлектрическая пленка образуется на всех танталовых частицах во всем пористом теле анода. Объем анода и толщина диэлектрической пленки, емкость катода определяют общую емкость конденсатора.

Из вышеизложенного следует, что наиболее значимыми факторами, которые следует учитывать при конструировании анода, чтобы разработанное изделие соответствовало предъявляемым требованиям, является выбор порошка, плотности прессования, температуры спекания и напряжения оксидирования.

В различные периоды конденсаторостроения исследовали зависимость качества анодов и изготовленных из них конденсаторов от химической чистоты тантала, т. е. влияние на качество конденсаторов примесных включений, входящих в состав танталовых порошков, таких как инородные металлические элементы (Nb, Fe, Ti, W, Mo, Mg, Al, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Sn и т. д.) или углерод, т. к. они имеют отрицательное воздействие на механизмы утечки в жидком и твердом электролитах, в том числе влияют на механизм пробоя диэлектрика [25–28]. Было отмечено, что при увеличении напряжения оксидирования анода, т. е. при изготовлении высоковольных конденсаторов, влияние примесей значительно повышает риск пробоя [25].

Изготовление конденсаторов высоковольтного применения требует процедуры всесторонней оценки всех стадий производства анодов, в том числе приготовления танталового порошка, прессования объемно-пористого тела и последующего его спекания и оксидирования, проверки напряжения пробоя, электрических характеристик анода, например, таких как емкость, ток утечки, тангенс угла диэлектрических потерь.

Теоретически установлено, что наличие примесей в танталовом аноде создает разрушение в диэлектрике Ta_2O_5 [28]. При создании анодной оксидной пленки вследствие влияния примесного состава танталовых порошков образуется как кристаллическая структура, так и аморфная структура пленки. Разрабатываемые технологические приемы создания оксидной пленки аморфной структуры направлены на снижение степени вероятности появления областей с кристаллической структурой. Появление кристаллической структуры приводит к снижению ресурса работы конденсатора, а как следствие – к ухудшению его надежности.

Анализ данных [29–31] свидетельствует о том, что на первоначальной стадии изготовления конденсаторов, а именно при изготовлении высокопористых анодов, наиболее критичными операциями изготов-

ления, на которых необходимо выявлять дефекты, являются спекание высокопористого тела анода и оксидирование анода.

Оценка достаточности величины пробивного напряжения анодов является одним из факторов определения качества готовых анодов, а как следствие является залогом изготовления качественных танталовых конденсаторов.

Главной целью в данной работе является изучение возможности информативности отбраковки потенциально ненадежных объемно-пористых танталовых герметичных конденсаторов с жидким электролитом на стадии изготовления путем оценки достаточности величины напряжения пробоя танталового порошка анодной поверхности.

Методика эксперимента

Наиболее важными критериями оценки достаточности величины напряжения пробоя танталового порошка на стадии изготовления является недопущение увеличения токов утечки $I_{ут}$ до предельного значения I_1 в процессе изготовления и производственных испытаний (электротермотренировка), соответствие величины тангенса угла диэлектрических потерь tg δ нормативным значениям.

Как известно, большие токи утечки конденсаторов могут привести к отказу на квалификационных и периодических испытаниях, проявляющеемуся как пробой в «слабых» местах анодного тела, вздутие корпуса конденсатора, следствием которого может быть короткое замыкание аппаратуры у потребителя.

Объектом исследования являются 6 опытных партий герметичных танталовых объемно-пористых конденсаторов с жидким электролитом напряжением 200 В, приведенных в табл. 1.

Задачей исследования является анализ зависимости качества конденсаторов от значений пробивного напряжения танталового порошка анодной поверхности конденсатора путем оценки таких параметров, как ток утечки, тангенс угла диэлектрических потерь и выход годных готовых конденсаторов.

Результаты и их обсуждение

Как было сказано выше, в данном случае в условиях достаточности напряжения пробоя танталового порошка информативным критерием отказа конденсатора является увеличение тока утечки и тангенса угла диэлектрических потерь выше критического значения, установленного для конкретного типа конденсатора.

В табл. 2 для каждой партии приведем коэффициенты запаса напряжения пробоя относительно напряжения оксидирования и рабочего напряжения и оценочные критерии: граничные значения тока утечки

$I_{ут}$ и тангенса угла диэлектрических потерь tg δ конденсаторов, выход годных на операции «Измерение тока утечки», «Проверка по внешнему виду» (визуальная оценка вздутия корпуса конденсатора после проведения цикла электротермотренировка).

Таблица 1. **Исходные данные объекта исследования**

Партия,	Количество в партии, шт.	Рабочее напряжение конденсатора, В	Емкость конденсатора, мкФ	Плотность анодного тела при прессовании, г/см^3	Плотность анодного тела после спекания, г/см^3	Температура спекания, °С		Напряжение оксидирования конденсатора, $U_{окс}$, В		Напряжение пробоя танталового порошка анодной поверхности конденсатора, $U_{проб.}$, В	
						заданное значение	фактическая величина	1-й этапа	2-й этапа	фактическая величина	норма по сертификату на Та порошок
1	12	200	68	7,5	8,3	2100_{-50}	2100	300	240	336	300
2	12		47	8,0	8,5		2085	300	240	335	
3	12		68	7,5	8,1		2050	320	288	346	
4	12		68	7,5	8,1		2050	320	250	346	
5	12		68	7,5	8,35		2060	320	288	416	
6	12		68	7,5	8,35		2060	320	250	416	
7	12		68	8,0	8,53		2050	320	288	396	
8	12		68	8,0	8,53		2050	320	250	396	
9	12		68	8,0	8,61		2060	320	288	400	
10	12		68	8,0	8,61		2060	320	250	400	

Таблица 2. **Исследуемые характеристики объекта**

Партия	Номинал конденсатора, В×мкФ	Коэффициент запаса напряжения пробоя		Ток утечки конденсатора $I_{ут}$, мкА		Тангенс угла диэлектрических потерь конденсатора, tg δ, %		Выход годных на операции, %	
		относительно напряжения оксидирования, $U_{проб}/U_{окс1}$	относительно рабочего напряжения $U_{проб}/U_{раб}$	мин	макс	мин	макс	«Измерение тока утечки»	«Отбраковка по внешнему виду»*
1	200×68	1,12	1,68	5	7	16	17	100	100
2	200×47	1,12	1,68	3	8	11	12	100	80
3	200×68	1,08	1,73	3	9	10	11	100	0
4	200×68	1,08	1,73	15	20	11	12	100	30
5	200×68	1,30	2,08	5	6	11	12	60	0
6	200×68	1,30	2,08	15	15	12	13,5	100	90
7	200×68	1,24	1,98	5	14	12	13	90	10

Окончание табл. 2

Партия	Номинал конденсатора, В×мкФ	Коэффициент запаса напряжения пробоя		Ток утечки конденсатора $I_{ут}$, мкА		Тангенс угла диэлектрических потерь конденсатора, tg δ, %		Выход годных на операции, %	
		относительно напряжения оксидирования, $U_{проб}/U_{окс1}$	относительно рабочего напряжения $U_{проб}/U_{раб}$	мин	макс	мин	макс	«Измерение тока утечки»	«Отбраковка по внешнему виду»*
8	200×68	1,24	1,98	15	20	12	13	80	25
9	200×68	1,25	2,00	2	5	16	18	100	100
10	200×68	1,25	2,00	14	15	16	17	100	100
Примечание	–	–	–	Норма по НТД не более 38,8		Норма по НТД не более 50		–	–

* По критерию «Вздутие корпуса конденсатора».

На рис. 1–3 приведены графики зависимости по критериям «Ток утечки», «Тангенс угла диэлектрических потерь» и «Выход годных на критических операциях» в зависимости от напряжения пробоя танталового порошка анодной поверхности.

Рис. 1. Зависимость тока утечки конденсаторов от коэффициента запаса по напряжению пробоя танталового порошка анодной поверхности

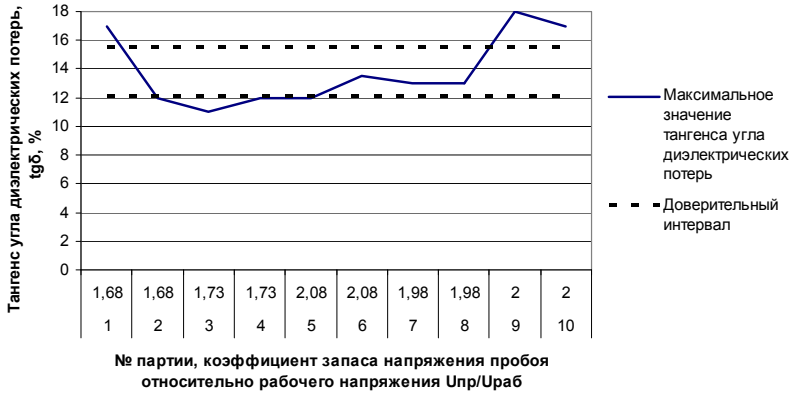


Рис. 2. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь конденсаторов от коэффициента запаса по напряжению пробоя танталового порошка анодной поверхности

Рис. 3. Зависимость выхода годных на операциях «Измерение тока утечки», «Отбраковка по внешнему виду» от коэффициента запаса по напряжению пробоя танталового порошка анодной поверхности

Анализ табл. 1, 2 и графиков зависимости, приведенных на рис. 1–3, дал следующий результат: отказы высоковольтных жидкостных танталовых конденсаторов на наиболее критичных операциях присутствуют как при минимальном, так и при максимальном значениях коэффициента запаса по напряжению пробоя танталового порошка анодной по-

верхности, значение которого, в свою очередь, входит в пределы нормативного значения по сертификату на танталовый порошок.

Непосредственной зависимости между качеством высоковольтных жидкостных танталовых конденсаторов и величиной пробивного напряжения анодной поверхности, находящейся в пределах нормативного значения, не наблюдается. Следовательно, вероятно, такие механизмы отказа высоковольтных танталовых конденсаторов с жидким электролитом, как большие токи утечки, вздутие корпуса конденсаторов могут быть вызваны иными механизмами, вызванными не непосредственно на операциях изготовления анода (наличие примесей в составе танталового порошка и т. д.), а после технологического процесса производства анода, например, при механическом повреждении анода при транспортировании или в процессе сборки конденсатора.

Заключение

Данные эксперимента свидетельствуют о том, что система отбраковки потенциально ненадежных объемно-пористых танталовых герметичных конденсаторов с жидким электролитом на стадии изготовления путем оценки достаточности величины напряжения пробоя танталового порошка анодной поверхности неинформативна. Для уточнения механизма отказа жидкостных танталовых конденсаторов необходим факторный эксперимент с варьированием нескольких переменных, определяющих процесс.

Список литературы

1. *Zednicek*, *T.* A study of field crystallization in tantalum capacitors and its effect on DCL and Reliability / T. Zednicek, J. Sikula, H. Leibovitz // CARTS Europe 2008: 20–23 Oct. 2008, Helsinki, Finland. – 2008. – Pp. 1–16.

2. Физика диэлектриков (область сильных полей) : учеб. пособие / Г. А. Воробьев, Ю. П. Похолков, Ю. Д. Королев, В. И. Меркулов. – Томск : Изд-во ТПУ, 2003. – 244 с.

3. *Ренне*, *В. Т.* Электрические конденсаторы. – 3-е изд. – Л. : Энергия, 1969. – 592 с.

4. *Беляева*, *Е. А.* Исследование влияния срока сохраняемости на эксплуатационные характеристики и состояние объемно-пористых танталовых конденсаторов / Е. А. Беляева, В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 1. – С. 96–99.

5. *Беляева*, *Е. А.* Влияние срока сохраняемости на эксплуатационные характеристики танталовых конденсаторов / Е. А. Беляева, В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Измерения, контроль и диагностика – 2014 : сб. материалов III Всерос. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2014. – С. 37–41.

6. *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. – С. 96–102.

7. *Беляева*, *Е. А*. Влияние дефектов на выход годных при производстве герметичных танталовых объемно-пористых конденсаторов с жидким электролитом // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов X Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (12–14 нояб. 2014 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2015. – С. 158–163.

8. *Кузнецова*, *В. А*. Надежность танталовых чип-конденсаторов на стадии изготовления в зависимости от качества материалов / В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов X Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (12–14 нояб. 2014 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2015. – С. 198–203.

9. *Кузнецова*, *В. А*. Ускоренная оценка сохраняемости танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов / В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сб. материалов III Всерос. науч.-техн. конф. асп., магистр. и молодых ученых с междунар. участием : электрон. науч. изд. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2015. – С. 311–313.

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

11. *Кузнецов*, *П. Л*. Исследование влияния характеристик технологического процесса изготовления на изменения эксплуатационных характеристик танталовых объемно-пористых конденсаторов во времени / П. Л. Кузнецов, В. А. Кузнецова, Г. В. Ломаев // Вестн. ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2014. – № 1(61). – С. 11–15.

12. *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.

13. Факторы, определяющие емкость танталового оксидного конденсатора на стадии изготовления анода / В. А. Кузнецова, П. Л. Кузнецов, А. А. Масалев, В. В. Муравьев // Влияние высокоэнергетических воздействий на структуру и свойства конструкционных материалов : тр. II Междунар. конф. – Сер. «Фундаментальные проблемы современного материаловедения». – 2013. – С. 233–240.

14. *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.

15. *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.

16. *Муравьев*, *В. В*. Погрешности измерений при ультразвуковой структуроскопии // Дефектоскопия. – 1988. – № 7. – С. 80–82.

17. *Теодорович*, *С. Б*. Активные технические системы на основе материалов и конструкций с управляемыми свойствами / С. Б. Теодорович, С. М. Кулаков, В. В. Муравьев // Изв. высш. учеб. завед. Черная металлургия. – 2001. – № 2. – С. 63–68.

18. *Муравьев*, *В. В*. Анализ факторов, влияющих на результаты контроля зеркально-теневым методом / В. В. Муравьев, О. В. Коробейникова, М. Б. Кадикова // Дефектоскопия. – 2007. – № 9. – С. 44–54.

19. *Муравьев*, *В. В.* Анализ погрешностей определения координат источников акустической эмиссии в конструкциях из листовой стали / В. В. Муравьев, С. А. Бехер, К. В. Власов // Дефектоскопия. – 2008. – № 7. – С. 53–59.

20. 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.

21. Критерии оценки технического состояния длительно работающего металла оборудования ТЭС на основе акустической структуроскопии / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, В. В. Муравьев, С. В. Фольмер // Дефектоскопия. – 2015. – № 2. – С. 44–51.

22. *Муравьев*, *В. В*. Прогноз качества изделий из сплава АЛ9 / В. В. Муравьев, К. Л. Комаров, А. В. Новиков // Литейное производство. – 1987. – № 10. – С. 8.

23. Оценка степени опасности дефектов при АЭ контроле металлических конструкций / В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова, Е. Ю. Лебедев, А. Е. Кареев // Дефектоскопия. – 2002. – № 8. – С. 44–52.

24. *Муравьев*, *В. В.* Сравнительная достоверность акустико-эмиссионного контроля боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов // В мире неразрушающего контроля. – 2014. – № 3. – С. 30–33.

25. High voltage tantalum powder – challenges and opportunities for new powder generation / M. Hagymási, H. Haas, C. Schnitter, H. Brumm // CARTS Europe 2011: 10–12 Oct. 2011, Nice, France. – 2011. – Pp. 8–18.

26. Sintering and electrical properties of tantalum anodes for capacitor applications / T. Balaji, R. Govindaiah, M. K. Sharma, Y. Purushotham, A. Kumar, T. L. Prakash // Materials Letters. – Vol. 56, Issue 4. – October 2002. – Pp. 560–563.

27. Study of Tantalum-Sintered Anodes / F. Climent, R. Capellades, E. Garcia, J. Gil // Materials Letters. – Vol. 32, Issue 2. – March 1994. – Pp. 119–125.

28. *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. 62–69.

29. *Кузнецова*, *В. А.* Исследование надежности танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов на основе экспериментальных данных /

В. А. Кузнецова, П. Л. Кузнецов, В. В. Муравьев // Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 3(59). – С. 88–91.

30. *Беляева*, *Е. А*. Управление производством танталовых конденсаторов с жидким электролитом посредством контроля операционного выхода годных / Е. А. Беляева, В. В. Муравьев // Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та. – 2015. – № 2. – С. 72–75.

31. 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. – С. 140–143.

Research of Capability for Tantalum Capacitor Rejection by Means of Breakdown Voltage Evaluation

Resultates of capacitors producton with different values of breakdown voltage were analysed by means of experimental methods and analytical findings by the example of leakage current, dissipation factor, yield evaluation.

Keywords: tantalum wet capacitor; reliability; breakdown voltage

УДК 621.372.51

Б. П. Верба, аспирант
E-mail: i412767438@yandex.ru
Д. Г. Мосунов, аспирант
E-mail: di.201@yandex.ru
К. В. Шишаков, кандидат физико-математических наук, доцент
E-mail: shishakovkv@mail.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Способы построения согласующих антенных устройств

Рассмотрены наиболее популярные методы построения согласующих антенных устройств. Выделены достоинства и недостатки согласующих устройств различного строения.

Ключевые слова: согласующее антенное устройство; согласование антенны; компенсация реактивного сопротивления; автоматическое согласующее устройство

Для обеспечения максимальной дальности радиосвязи необходимо обеспечить излучение максимума элетромагнитной энергии, а для создания условий, способствующих передаче максимальной энергии от усилительного тракта к антенне, применяют согласующее антенное устройство (САУ).

Согласующее антенное устройство представляет собой согласующий четырехполюсник, обеспечивающий компенсацию суммарного реактивного сопротивления антенны и радиоаппаратуры и трансформацию активного сопротивления антенны до величины оптимального нагрузочного сопротивления радиоаппаратуры (усилителя мощности), равной активной составляющей его внутреннего сопротивления.

Основными параметрами автоматического САУ являются: рабочий диапазон частот, коэффициент стоячих волн (КСВ), время настройки и коэффициент передачи мощности.

Коэффициент стоячей волны характеризует степень согласования антенны с ВЧ-трактом. Если антенна настроена в резонанс т. е. в ходе настройки произошла компенсация реактивной составляющей и согласование с ВЧ-трактом питания по сопротивлению, то КСВ в идеальном случае будет равен единице.

© Верба Б. П., Мосунов Д. Г., Шишаков К. В., 2017

Требование по времени настройки автоматического САУ необходимо для обеспечения режима пакетной радиосвязи. В пакетной радиосвязи передача и прием ведутся короткими и сжатыми по времени пакетами данных. Требование обеспечивается реализацией поисково-вычислительного алгоритма настройки и применением элементов коммутации с малым временем коммутации.

Коэффициент передачи САУ важен с точки зрения передачи мощности от блока усилителя мощности к антенне с минимальными потерями. Снижение коэффициента передачи мощности приводит к снижению КПД согласующего устройства, и, как следствие, к выделению тепла внутри блока, что приводит к нагреву элементов и осложняет температурный режим. Один из способов улучшения коэффициента передачи мощности – это общее уменьшение потерь в конструкции печатных проводников, применение реактивных элементов согласования с высокой добротностью [1].

АСАУ с применением электродвигателя

В настоящее время у многих производителей радиостанций в исполнительном механизме перестройки используются традиционные элементы, перестраиваемые с помощью электродвигателей рис. 1.

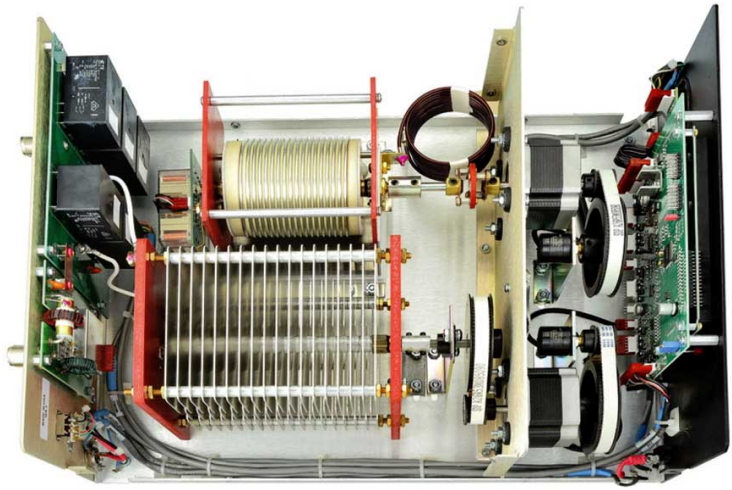


Рис. 1. Внешний вид автоматического САУ с применением электродвигателей

Известны достоинства такого построения:

– способность выдерживать значительные энергетические нагрузки;

– большие пределы изменения переменного параметра (индуктивности или емкости);

– отсутствие собственных нелинейных искажений.

Сокращение времени настройки АСАУ на таких элементах сводится к использованию оптимального состава датчиков рассогласования и выбору определенного алгоритма настройки. Одновременно практикуется сознательное сокращение коэффициентов перекрытия переменных органов настройки и введение дополнительных дискретных элементов схемы, включение которых связано с установкой рабочей частоты.

Достигнутое время настройки АСАУ в несколько секунд является пределом для механических перестраиваемых элементов.

Результаты расчета КПД АСАУ с электродвигателем настройки переменных органов, работающим на штыревую антенну высотой 2,4 м при добротности контура $Q = 50$ и $Q = 100$ приведены в табл. 1.

Таблица 1. **КПД АСАУ с применение электродвигателя**

F, МГц	3,0	5,0	8,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
η при $Q = 50$	0,57	0,58	0,65	0,64	0,78	0,86	0,94	0,97
η при $Q = 100$	0,73	0,74	0,79	0,78	0,87	0,92	0,96	0,97

Анализ энергетических характеристик АСАУ с электродвигателем настройки переменных органов показывает, что его КПД практически равен КПД САУ с ручной настройкой переменных органов [2].

Таким образом, применение электродвигательного способа настройки переменных элементов контура обеспечивает максимальное КПД при минимальных массе и габаритах АСАУ.

Достигнутое время настройки в несколько секунд для АСАУ с механически перестраиваемыми элементами не всегда соответствует требованиям современных средств связи.

Автоматическое САУ с электроннoперестраиваемыми элементами

Одним из направлений повышения скорости перестройки АСАУ является применение в качестве переменных органов элементов индуктивного и емкостного характера с электронной перестройкой, таких как ферровариометры с подмагничиванием постоянным током, варикапы, вариконды и варакторы. Перестройка таких элементов осуществляется соответствующим изменением управляющего напряжения или тока, подводимым к ним.

Вариконды представляют собой сегнетокерамические конденсаторы, диэлектрическая проницаемость которых изменяется в зависимости от напряженности приложенного электрического поля. С ростом напряженности поля диэлектрическая проницаемость также увеличивается, достигая максимума при сравнительно слабых полях. При дальнейшем увеличении напряженности электрического поля диэлектрическая проницаемость падает. Коэффициент перекрытия по емкости лежит в пределах 4–5. Вариконды допускают применение в устройствах с рабочим диапазоном частот до 100 МГц (рис. 2) [3].

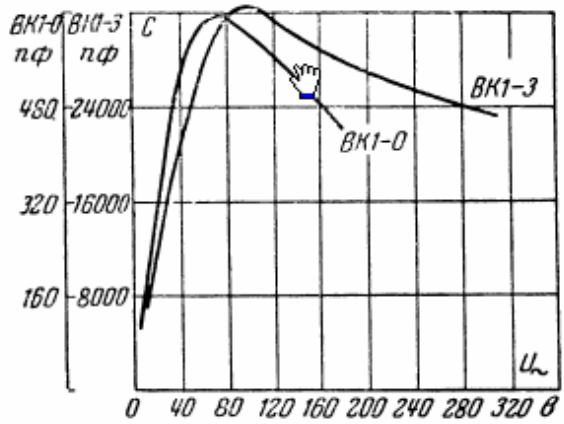


Рис. 2. Зависимость емкости варикондов ВК1-0 и ВК1-3 от переменного напряжения

Варикап представляет собой приборы, в которых используется нелинейная емкость полупроводникового диода. В настоящее время используется главным образом емкость запертого *p-n*-перехода (барьерная емкость), поскольку такие варикапы обладают достаточной добротностью (до 100) и их параметры мало зависят от частоты и температуры.

Примерная зависимость емкости варикапа от приложенного обратного напряжения приведена на рис. 3.

Коэффициент перекрытия по емкости у варикапов на линейном участке несколько меньше, чем у варикондов. Поэтому варикапы могут использоваться для плавной перестройки согласующей цепи в небольших пределах при малой реактивной мощности (десятые доли ВАр) [4].

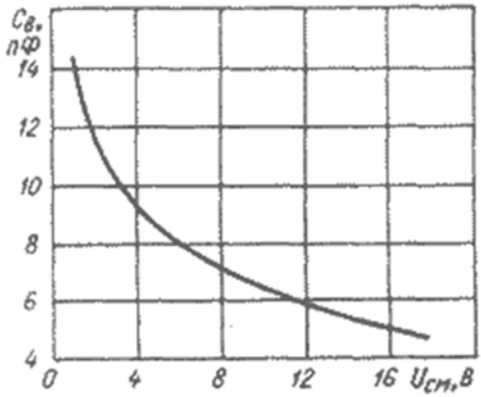


Рис. 3. Зависимость барьерной емкости варикапа от напряжения смещения

Ферровариометры. Принцип действия управляемого элемента с ферритом основан ни использовании зависимости магнитной проницаемости сердечника от напряженности постоянного магнитного поля. Изменяя постоянный ток в обмотке подмагничивания, которая находится на сердечнике электромагнита, тем самым изменяем напряженность постоянного магнитного поля и, соответственно, магнитную проницаемость ферритового сердечника. Поскольку $L = k\mu_r$, где k – некоторое вещественное число, изменяя проницаемость сердечника, меняется тем самым индуктивность вариометра. Большие пределы и достаточная линейная зависимость магнитной проницаемости сердечника от постоянного магнитного поля дает возможность строить индуктивные элементы с коэффициентом перекрытия до 10. Скорость перестройки ферровариометра в основном определяется параметрами цепи подмагничивания и составляет десятки миллисекунд. К недостаткам ферровариометров следует отнести нелинейные искажения, которые они вносят в мощный радиосигнал, ограничение по уровню проходящей мощности (обычно не более 1 кВт), воздействие паразитных емкостных связей между ортогональными катушками подмагничивания и рабочими катушками индуктивности, а также необходимость в источнике постоянного тока, схеме регулирования и запоминания величины тока подмагничивания сердечника.

В результате анализа достоинств и недостатков электронноперестраиваемых элементов установлено, что автоматизированные устройства, использующие подобные элементы, характеризуются малым временем перестройки – в пределах сотен миллисекунд. Однако другие

параметры таких устройств ограничены: низкая собственная добротность, малые пределы изменения переменного параметра, значительные нелинейные искажения, низкая устойчивость к воздействию дестабилизирующих факторов, значительная потребляемая мощность по цепям управления. Это не позволяет практическим конструкциям с такими элементами получить какое-либо применение.

Автоматическое САУ на дискретных элементах

Дискретные элементы согласующего контура представляют собой совокупность элементов индуктивности и емкости, соединенных последовательно или параллельно, величины которых соотносятся друг с другом в геометрической прогрессии со знаменателем, равным 2^n, где n – количество элементов согласования (рис. 4).

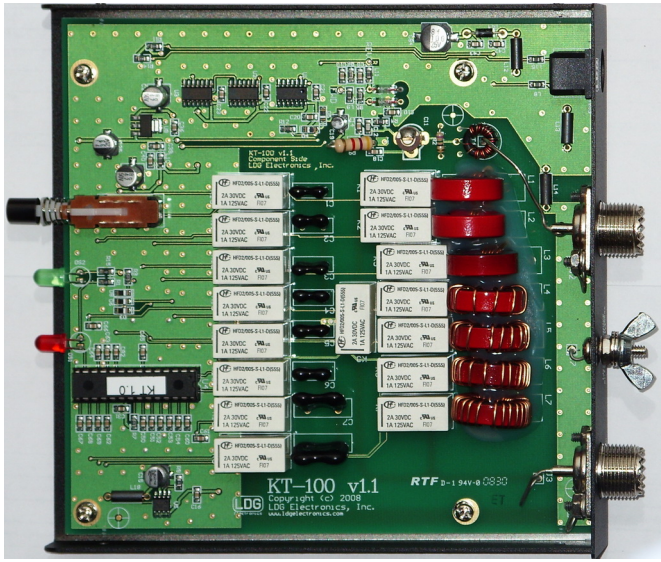


Рис. 4. Внешний вид САУ с применением дискретных элементов

Линейка дискретных элементов емкости или индуктивности строится таким образом, чтобы номинал последующего элемента линейки был в два раза больше предыдущего. Подбор и включение необходимых дискретных элементов в контур осуществляется с помощью программно-реализуемых алгоритмов. Коммутация элементов осуществляется, как правило, с помощью реле. При использовании поляризованных реле возможно добиться минимального электропотребления

согласующим устройством (питание управляющих и коммутационных цепей необходимо только на время настройки САУ).

К основным достоинствам использования дискретной настройки АСАУ следует отнести:

– малое время настройки;

– высокая приспособленность к использованию заранее подготовленных частот;

– возможность применению дискретных элементов с высокой собственной добротностью;

– большое перекрытие по номиналам линеек реактивных элементов;

– низкое электропотребление при использовании поляризованных реле.

Следует отметить, что масса и габаритные размеры АСАУ на релейных коммутаторах превышает массу и габаритные размеры АСАУ на электродвигательных элементах настройки.

Данный метод построения согласующих устройств используется в большинстве современных согласующих устройств военного и гражданского назначения.

Выводы

Согласующие устройства с применением электродвигателей имеют максимальную линейность и плавность реактивностей, включающихся в согласующий контур, но имеют существенный недостаток в виде долгого времени настройки и установления на заранее подготовленные частоты. Что приводит к невозможности применения согласующих устройств такого типа для работы с радиосредствами в сложных режимах (пакетная передача данных, режим псевдослучайно перестройки частоты и т. д.). Применение согласующих устройств на дискретных элементах наиболее распространено на сегодняшний день. Но при разработке устройств такого типа необходимо применять сложные цепи коммутации и разрабатывать сложные алгоритмы настройки, что ведет к удорожанию конечного изделия.

Список литературы

1. *Ротхаммель*, *К*. Антенны. – М. : Энергия, 1969. – 312 с.

2. *Бекетов*, *В. И.* Измерения и испытания при конструировании и регулировке радиолюбительских антенн / В. И. Бекетов, К. П. Харченко. – М. : Связь, 1971. – 307 с.

3. *Вербицкая*, *Т. Н*. Вариконды. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1958. – 64 с.

4. *Берман*, *Л. С*. Нелинейная полупроводниковая ёмкость. – М. : Физматгиз, 1963. – 86 с.

Ways of Constructing the Antenna Tuner

The article describes the most popular methods of construction of the matching antenna devices. Highlighted the advantages and disadvantages of matching devices with different structures.

Keywords: antenna tuner; antenna matching; reactance compensation; avtomatic antenna tuner

УДК 004.942

А. В. Гаврилов, студент
К. А. Зорин, студент
Т. А. Шумилова, студент
Д. С. Яшина, студент
E-mail: tasya2@list.ru
В. А. Глушков, кандидат технических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Сравнение возможностей анализа динамических характеристик линейных систем в программах *Matlab* и *Scilab*

Статья посвящена сравнению двух программ – Matlab и Scilab. В ней приводятся программные коды для проведения анализа передаточной функции, а именно построения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), фазочастотной характеристики (ФЧХ), годографа, временных характеристик: импульсной и переходной.

Ключевые слова: *Matlab*; *Scilab*; АЧХ; ФЧХ; годограф; временные характеристики

Введение

Существует множество программ для математических и технических расчетов. В даннной статье предлагается сравнение двух наиболее известных из них.

Matlab – это высокоуровневый язык и интерактивная среда для программирования, численных расчетов и визуализации результатов. С помощью *Matlab* можно анализировать данные, разрабатывать алгоритмы, создавать модели и приложения.

Matlab широко используется в таких областях:

– обработка сигналов и связь;

– обработка изображений и видео;

– системы управления;

– автоматизация тестирования, измерений и т. п.

Matlab позволяет максимально просто работать с матрицами реальных, комплексных и аналитических типов данных.

Scilab – это открытый свободно распространяемый пакет прикладных математических программ для инженерных (технических) и научных расчетов. Это одна из самых полных общедоступных альтернатив *Matlab*.

© Гаврилов А. В., Зорин К. А., Шумилова Т. А., Яшина Д. С., Глушков В. А., 2017

Постановка задачи

Построение частотных, импульсной и переходной характеристик заданной функции в средах программ для решения технических задач *Matlab* и *Scilab* и соответственно их сравнение на всех этапах работы: задание функции, построение частотных, импульсной, переходной характеристик.

Содержательная часть

Задание передаточной функции стационарной линейной системы

Передаточная функция линейной стационарной системы должна быть представлена в дробно-рациональном виде:

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

Тогда в среде *Matlab* объект с такой функцией задается при помощи команды $tf\left(\left[b_m b_{m-1} \ldots b_1 b_0\right], \left[a_n a_{n-1} \ldots a_1 a_0\right]\right)$, где в квадратных скобках вводятся коэффициенты числителя и знаменателя передаточной функции (1).

В качестве примера используем передаточная функция:

$$W(p)=\frac{0,5p}{0,5p^2+1,75p+1}. \quad (2)$$

В *Matlab* команда для создания объекта под именем «*W*» с передаточной функцией (2) будет такая:

$$W = tf\left(\left[0.5\ \ 0\ \ 0\right], \left[0.5\ \ 1.75\ \ 1\right]\right) W = tf\left(\left[0,5\right]\right). \quad (3)$$

В среде *Scilab* был выбран самый удобный метод задания функции.

Данный способ удобен тем, что не нужно вводить уравнение полностью вручную, можно задать два полинома (числителя и знаменателя) и разделить один на другой. Но при этом необходимо учесть, что коэффициенты, в отличие от *Matlab*, задаются в обратном порядке, т. е. например, полином вида:

$$0,5p^2+1,75p+1 \quad (4)$$

запишется как выражение

$$\left[1\ \ 1.75\ \ 0.5\right]. \quad (5)$$

При задании полинома после вектора через запятую пишутся '*s*' – переменная, относительно которой решается уравнение, и '*c*' – параметр, показывающий, что вектором задаются коэффициенты, а не корни данного уравнения. Это следует указывать отдельно для знаменателя и числителя [1].

В итоге команда *Scilab*, создающая объект под именем "*W*" с передаточной функцией (2), будет иметь вид:

$$W = \frac{\text{poly}\left(\left[0 \;\; 0 \;\; 0.5\right], 's', 'c'\right)}{\text{poly}\left(\left[1 \;\; 1.75 \;\; 0.5\right], 's', 'c'\right)}. \qquad (6)$$

Построение частотных характеристик: АЧХ и ФЧХ

Как в *Matlab*, так и *Scilab* есть команда bode(LTI-объект), которая строит частотные характеристики (диаграмму Боде) [2].

В *Matlab* это реализуется следующим образом:

$$\text{bode}(W). \qquad (7)$$

Результат работы команды (7) в *Matlab* приведен на рис. 1.

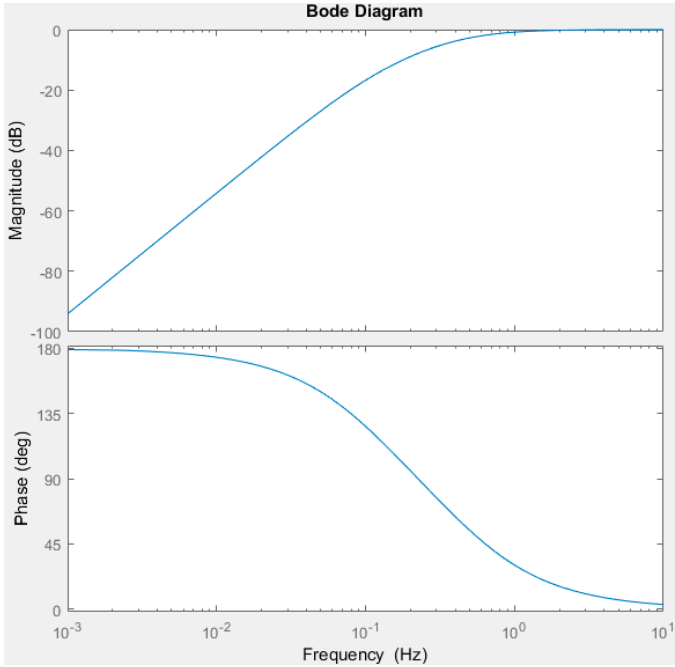


Рис. 1. АЧХ и ФЧХ, полученные при использовании среды *Matlab*

В *Scilab* для получения АЧХ и ФЧХ необходимо ввести:

$$h = \text{syslin}('c', W); \text{clf}(); \text{bode}(h, 0.001, 10), \quad (8)$$

где syslin('*c*', *W*) – задание непрерывной системы автоматического управления по ее передаточной функции; clf() – очистка предыдущего графика; bode – команда построения АЧХ и ФЧХ; 0,001 – шаг построения графика; 10 – максимальное значение частоты в герцах на оси абсцисс.

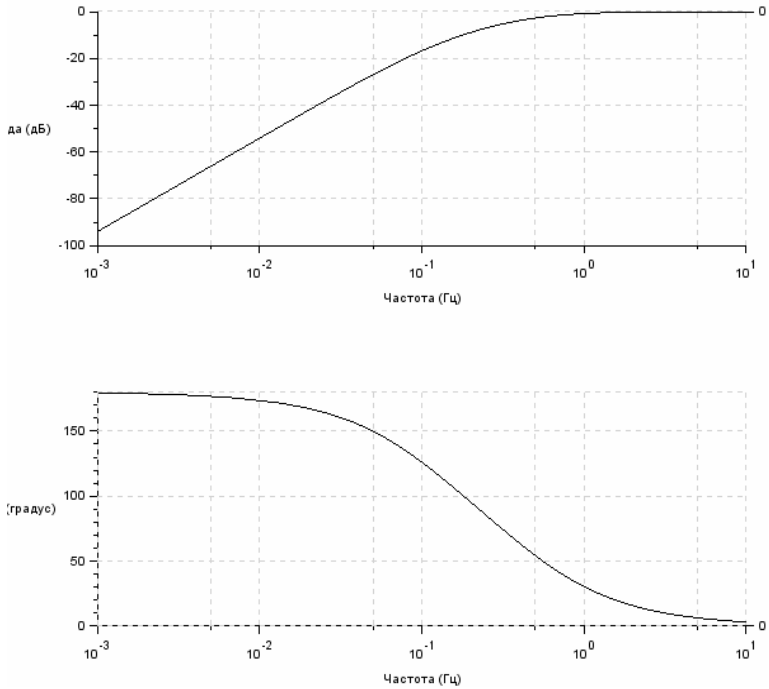


Рис. 2. АЧХ и ФЧХ, полученные при использовании среды *Scilab*

Построение частотных характеристик: годограф

Для построения годографа в средах *Matlab* и *Scilab* существует функция “nyquist”.

В *Matlab* она задается таким образом:

$$\text{nyquist}(W) \quad (9)$$

Результат работы команды (9) – на рис. 3.

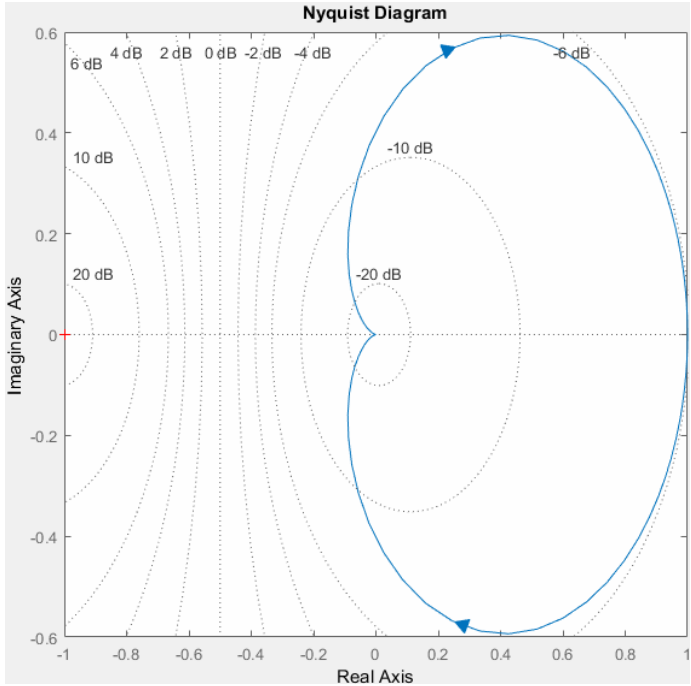


Рис. 3. Годограф, полученный при использовании среды *Matlab*

В *Scilab* функция выглядит так:

$$h = \text{syslin}('c', W);\ \text{clf}();\ \text{nyquist}(h), \tag{10}$$

где syslin('*c*',*W*) и clf() те же, что в предыдущем случае, а nyquist(*h*) – построение графика годографа (рис. 4) [3].

Построение временных характеристик: переходная характеристика

Переходная функция. В *Matlab* для построения переходной функции необходимо ввести команду:

$$\text{step}(W), \tag{11}$$

в *Scilab* – команду:

$$\text{plot}\left(\text{csim}('\text{step}', 0:0.01:7, W)\right), \tag{12}$$

где plot – построение двумерного графика; csim – моделирование временной характеристики линейной системы; 'step' – обозначение входного воздействия (в данном случае это единичная ступенчатая функция).

Результат работы обеих команд – на рис. 5.

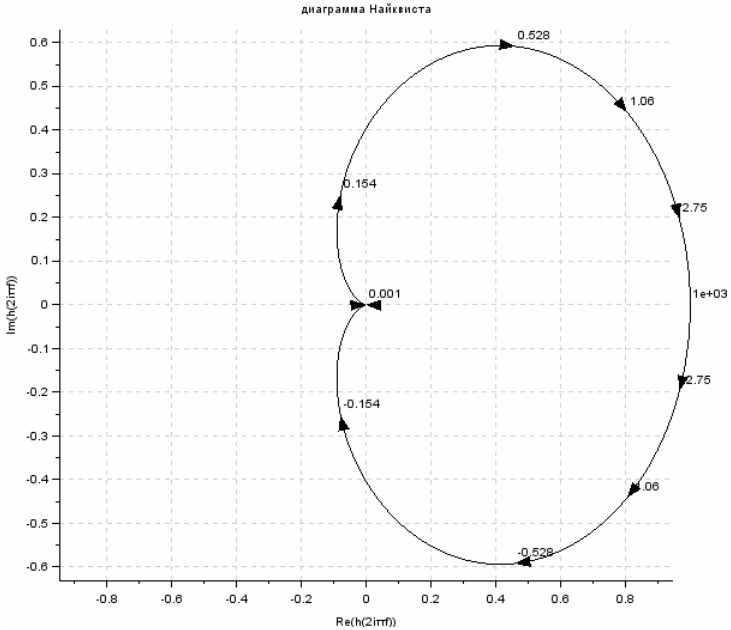


Рис. 4. Годограф, полученный при использовании среды *Scilab*

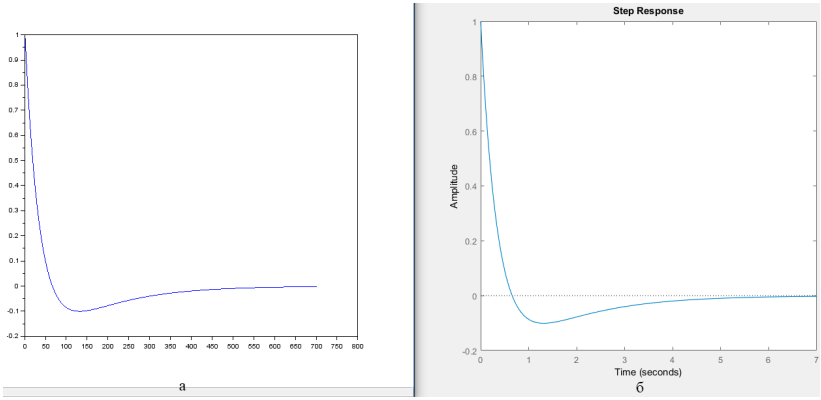


Рис. 5. Переходная характеристика, полученная при использовании среды:
а – Scilab; *б – Matlab*

Построение временных характеристик: переходная характеристика

В *Matlab* она строится командой:

$$\text{impulse}(W), \tag{13}$$

а в *Scilab* – командой:

$$\text{plot}\left(\text{csim}\left('\text{impulse}', 0:0.01:6, W\right)\right). \tag{14}$$

Результат представлен на рис. 6.

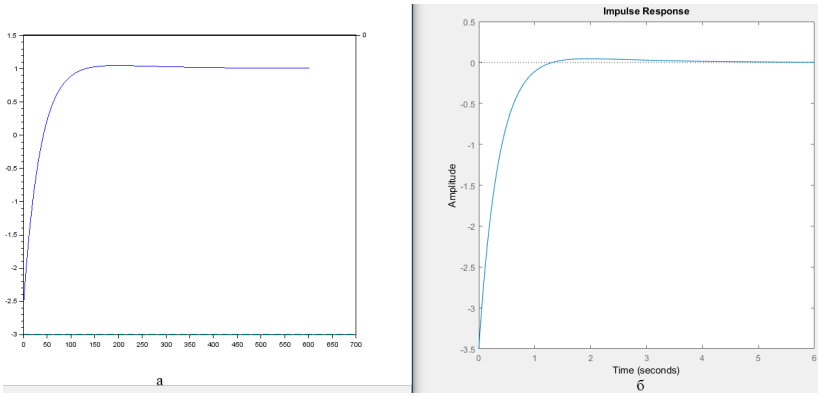


Рис. 6. Импульсная характеристика в среде: *а – Scilab*; *б – Matlab*

Выводы

В ходе работы были выявлены преимущества и недостатки программ *Scilab* и *Matlab*. *Matlab* более популярен, что упрощает его изучение, т. к. по нему имеется большое количество обучающего материала. Также он имеет удобный графический интерфейс, т. е., чтобы изменить цвет, толщину графиков, не нужно прописывать это в коде, как *Scilab*. Но *Scilab* бесплатный, свободно распространяемый и требует меньше ресурсов памяти ПК, что выгодно отличает его от *Matlab*.

Немаловажным является том факт, что синтаксис языка одинаковый, т. е. можно одни и те же функции использовать в обеих программах. Но в *Scilab* нужно указывать дополнительные параметры функций, в отличие от *Matlab*, в котором эти свойства учитываются автоматически и не приходится дополнительно их прописывать, что значительно упрощает выполнение поставленной задачи.

Таким образом, в качестве вспомогательного инструмента при изучении дисциплин рациональнее использовать *Scilab*, а для профессиональных работ и больших проектов лучше использовать *Matlab*.

Список литературы

1. Решение инженерных задач в Scilab / А. Б. Андриевский, Б. Р. Андриевский, А. А. Капитонов, А. Л. Фрадков. – СПб. : НИУ ИТМО, 2013. – 97 с.

2. *Алексеев*, *Е. Р.* Scilab: Решение инженерных и математических задач / Е. Р. Алексеев, О. В. Чеснокова, Е. А. Рудченко. – М. : ALT Linux ; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 269 с.

3. *Акчурин*, *Э. А.* Программирование в системе Scilab / Э. А. Акчурин, В. Н. Тарасов – Самара : ПГУТИ, 2009. – 68 с.

Comparison of Matlab and Scilab Capabilities in the Analysis of Linear Systems Dynamic Response

In this article, Matlab and Scilab software are compared by solving the same problems – calculating frequency- and time-domain responses. There given the corresponding listings of commands for both software products that create transfer function objects, build their magnitude frequency response, phase frequency response, locus, unit step response and unit pulse response.

Keywords: Matlab; Scilab; frequency response; locus; time-domain response

УДК 004.942

В. А. Глушков, кандидат технических наук, доцент
А. В. Балашов, студент
А. Р. Халисламова, студент
В. С. Кузнецова, студент
Ю. В. Буторина, студент
E-mail: GL@idz.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Сравнение возможностей схемотехнического анализа в программах OrCAD 9.2 и OrCAD 17.2

Статья посвящена сравнению возможностей схемотехнического анализа в пакетах моделирования OrCAD v.9.2 и OrCAD v.17.2. Для этого в обоих пакетах для одной и той же электронной схемы были проведены следующие виды анализа: во временной области, в частотной области, параметрический анализ, анализ статической характеристики. В ходе их моделирования сравнивались интерфейс, способы создания схем, способы создания моделирования и работа с графиками.

Ключевые слова: OrCAD; анализ; сравнение; моделирование; интерфейс; графический редактор; параметры

Введение

В 2016 году фирма *Cadence Design Systems* выпустила новую версию программного пакета сквозного проектирования радиоэлектронных устройств, влючающего функции схемотехнического моделирования, OrCAD 17.2. Однако среди пользователей продуктов данной фирмы еще сохраняется множество тех, кто используют версию 9.2, где в качестве редактора электрических схем используется программа *Schematics*. Однако в версии 17.2 данного редактора нет, он был полностью заменен программой *Capture CIS*. Сравним некоторые возможности схемотехнического моделирования в двух версиях программного пакета и в двух различных редакторах [1–6].

Сравнение пакетов программ OrCAD v.17.2 и OrCAD v.9.2

Создадим модель одной и той же электронной схемы на основе модели операционного усилителя и проведем ряд компьютерных экспериментов над ней в обеих программах, сравнивая как интерфейс и осо-

© Глушков В. А., Балашов А. В., Халисламова А. Р., Кузнецова В. С., Буторина Ю. В., 2017

бенности настройки параметров моделирования, так и результаты моделирования и возможности их обработки.

PSpice Schematics из пакета версии 9.2 – графический редактор электронных схем, заимствованный еще из пакета *DesignLab*. Он был полностью заменен программой *Capture CIS*, разработанной OrCAD. Эти две программы имеют ряд различий.

Для начала сравним интерфейс обеих программ (рис. 1, 2).

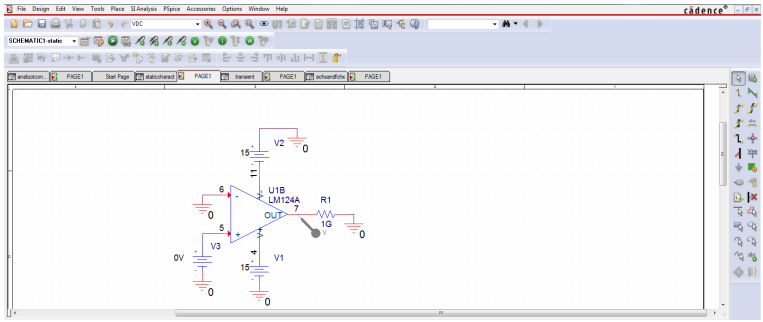


Рис. 1. Рабочее поле программы *Capture*

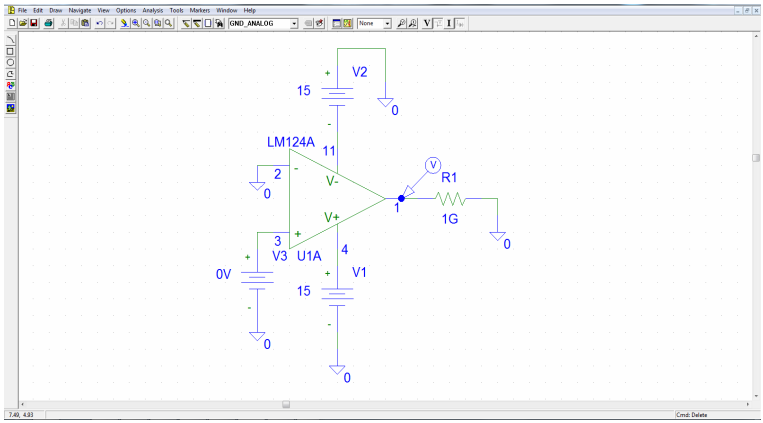


Рис. 2. Рабочее поле программы *Schematics*

Имеются незначительные различия в условных графических обозначениях некоторых элементов. Незначительно отличаются принципы поиска необходимых элементов. Способы задания параметров элементов стали различаться существеннее – в программе *Capture* пользо-

вателю необходимо совершить больше действий, чтобы это сделать. В целом принципы построения электрической принципиальной схемы в обеих программах схожи.

Сравним интерфейс настроек имитационного моделирования. Диалоговые окна данных настроек в обеих программах представлены на рис. 3, 4.

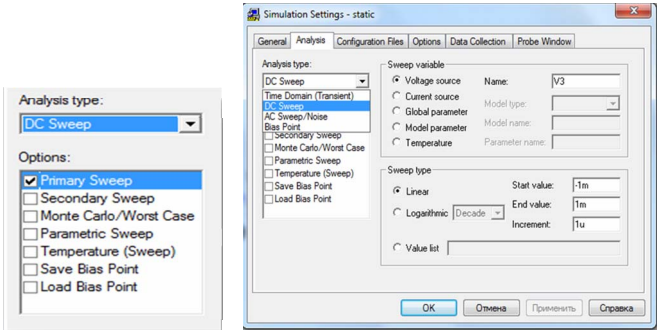


Рис. 3. Настройки моделирования в OrCAD v.17.2

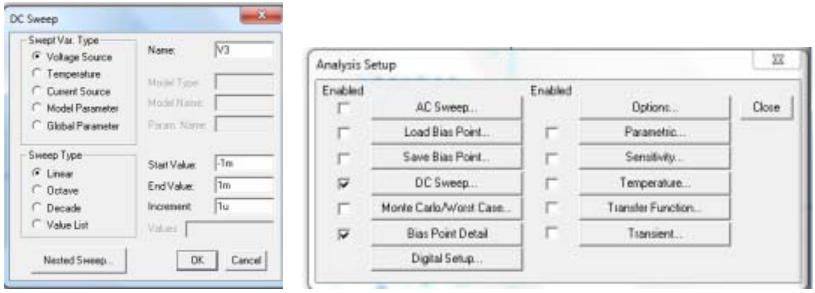


Рис. 4. Настройки моделирования в OrCAD v.9.2

Как видно, несколько изменилась форма, но содержание осталось аналогичным, что не создает проблем при переходе от одной версии к другой.

Мы провели несколько видов компьютерного анализа данной схемы, а именно: анализ во временной области, анализ в частотной области, параметрический анализ, анализ статической характеристики. На рис. 5 и 6 приведен один из результатов такого анализа, а именно, построенная в программе *PSpice* статическая характеристика операционного усилителя.

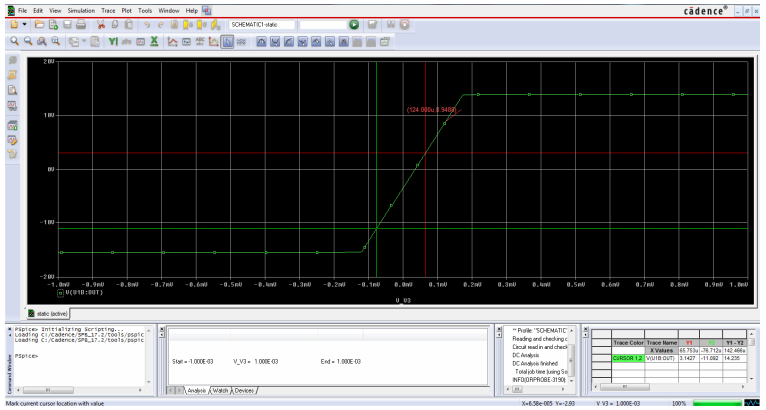


Рис. 5. Работа с графиками в OrCAD v.17.2

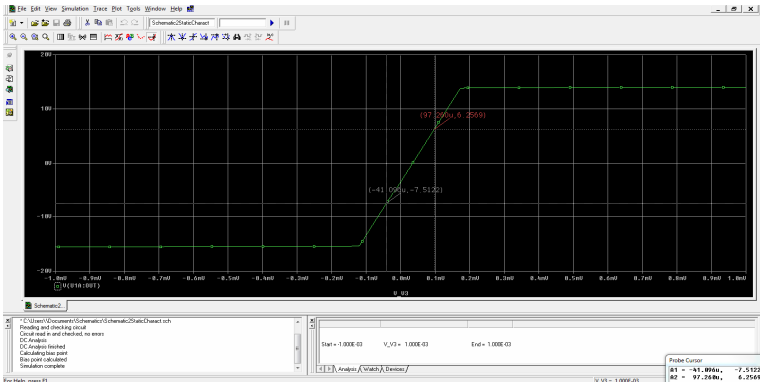


Рис. 6. Работа с графиками в OrCAD v.9.2

Как видно, результаты моделирования в обеих версиях идентичны. Интерфейс программы анализа изменился в сторону небольших улучшений, повышающих удобство и эффективность работы с графиками.

Особенности версии OrCAD v.17.2 Lite

Версия пакета OrCAD v.17.2 Lite является полнофункциональным продуктом и предлагает каждую функциональную возможность полного OrCAD. Имеются ограничения только по размеру, сложности проекта, а также по некоторым аспектам моделирования (например, количество статистических прогонов при анализе методом Монте-

Карло ограничено десятью). Версия OrCAD v.17.2 Lite позволяет ознакомиться со всеми возможностями и функциональностью полного варианта программного обеспечения и идеально подходит для учебных целей, поскольку также является свободно распространяемой.

Из новых возможностей пакета можно выделить проектирование гибких печатных плат, экспорт проекта в файл HTML с возможностью его просмотра в любом веб-браузере, защиту проекта паролем, повышение производительности.

Выводы

Новый графический редактор схем *Capture CIS*, является полноценным продолжением всех традиций схемотехнического моделирования, которые были заложены в *Schematics*.

Список литературы

1. *Болотовский*, *Ю. Б.* Опыт моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD 9.2 / Ю. Б. Болотовский, Г. И. Таназлы // Силовая электроника. – 2004. – № 1. – С. 90–95.

2. *Болотовский*, *Ю. Б.* OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга / Ю. Б. Болотовский, Г. И. Таназлы. – СПб. : Солон-Пресс, 2005. – 200 с.

3. *Кеоун*, *Дж.* OrCAD PSpice. Анализ электрических цепей / Дж. Кеоун. – СПб. : «ДМК Пресс», 2011. – 630 с.

4. Иллюстрированный самоучитель по OrCAD. – URL: http://rus-komp.ru/index.php?pid=282 (дата обращения: 15.11.16).

5. Моделирование на функциональном уровне в OrCAD 9.2. – URL: http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/03_03/stat_140.htm (дата обращения: 15.11.16).

6. Общая характеристика программы OrCAD Capture. – URL: http://www.radiomaster.ru/cad/orcad/glava2/index1.php (дата обращения: 15.11.16).

Comparison of Capabilities of Electrical Circuits Schematic Analysis in OrCAD 9.2 and OrCAD 17.2

The article considers coparison of schematic modeling and simulation capabilities of OrCAD v.9.2 and OrCAD v.17.2 software. The same sample circuit was created and subject to the following type of simulations: in time domain, in frequency domain, parametrical analysis, steady-state response. The objective of the analysis was to compare the interface, schematics creation technique, simulation parameters setup ways, processing the graphs.

Keywords: OrCAD; schematic analysis; comparison; simulation; interface; simulation parameters

УДК 662.754

В. А. Глушков, кандидат технических наук, доцент
В. Г. Гравшин, студент
E-mail: Vladimir.Glushkov@gmail.com
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Обзор метанольных топливных элементов

Статья содержит ознакомительную информацию о принципе работы метанольных топливных элементов, их характеристиках и актуальных проблемах дальнейшего развития.

Ключевые слова: топливный элемент; метанол; альтернативный источник энергии; химический источник тока

В настоящее время тема топливных элементов затрагивается довольно часто. 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. Это должно, с одной стороны, ослабить привязку мобильных устройств к «розетке», с другой – продлить срок их автономной работы [1–6].

Существует много различных видов топливных элементов, однако основные принципы работы несмотря на существенно отличающиеся эксплуатационные характеристики остаются неизменными. Любой топливный элемент представляет собой устройство электрохимического преобразования энергии. Оно вырабатывает электричество из некого количества топлива (со стороны анода) и окислителя (со стороны катода). Реакция протекает в присутствии электролита (вещество содержащее свободные ионы и ведущее себя как электропроводящая среда). В принципе в любом таком устройстве есть некие реагенты, поступающие в него и продукты их реакции, выводимые после осуществления электрохимической реакции. Электролит в данном случае служит лишь средой для взаимодействия реагентов и не меняется в топливном элементе. Исходя из такой схемы идеальный топливный элемент должен работать так долго, пока есть подача необходимых для реакции веществ.

© Глушков В. А., Гравшин В. Г., 2017

Реакция катализа, проходящая в топливном элементе, выбивает электроны и протоны из топлива, а движущиеся электроны образуют электрический ток. В роли катализатора, ускоряющего реакцию, в топливных элементах, как правило, используются платина или ее сплавы. Другой каталитический процесс возвращает электроны, объединяя их с протонами и окислителем, в результате чего образуются продукты реакции (выбросы). В основном эти выбросы представляют собой простые вещества: воду и углекислый газ.

Метанольный топливный элемент является подвидом устройств с протонообменной мембраной. В них используется метанол, заправляемый в топливный элемент без дополнительной очистки. При этом метиловый спирт гораздо проще хранить, и он не взрывоопасен (хотя горюч и может вызывать слепоту). У метанола энергетическая емкость существенно выше, чем у сжатого водорода (рис. 1).

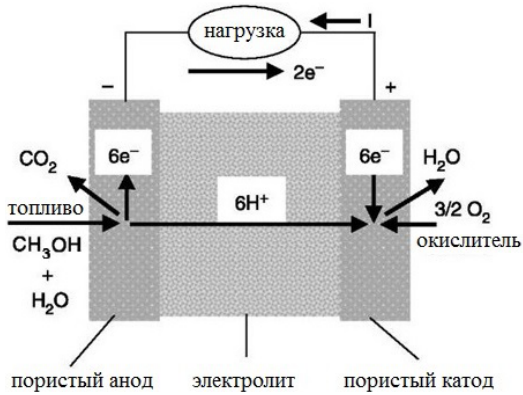


Рис. 1. Принцип работы метанольного топливного элемента

В качестве электролита используется полимер, а в качестве носителя заряда – ион водорода (протон). Однако, жидкий метанол (CH_3OH) окисляется при наличии воды на аноде с выделением CO_2, ионов водорода и электронов, которые направляются по внешней электрической цепи, при этом генерируется электрический ток. Ионы водорода проходят по электролиту и вступают в реакцию с кислородом из воздуха и электронами, поступающими с внешней цепи, с образованием воды на аноде.

Реакция на аноде: $CH_3OH + H_2O \Rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$;

Реакция на катоде: $3/2O_2 + 6H^+ + 6e^- \Rightarrow 3H_2O$;

Общая реакция элемента: $CH_3OH + 3/2O_2 \Rightarrow CO_2 + 2H_2O$.

Выше был описан так называемый прямой метанольный топливный элемент. Кроме него существует обратный метанольный топливный элемент (рис. 2). Главное отличие в том, что метанол на стадии, предшествующей выработке электричества, преобразуется в водород и углекислый газ. Это происходит в специальном устройстве, именуемом топливный процессор. После этой предварительной стадии (реакция осуществляется при температуре выше 250 °С) водород вступает в реакцию окисления, в результате которой образуется вода и вырабатывается электричество.

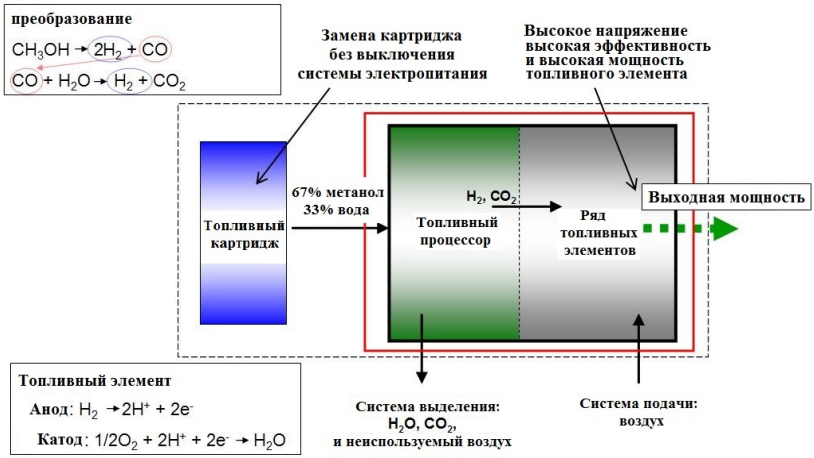


Рис. 2. Принцип работы обратного метанольного топливного элемента

Основными достоинствами метанольных топливных элементов являются низкие рабочие температуры и небольшие габариты благодаря использованию жидкого топлива. Сам метанол является менее требовательным к условиям хранения, транспортировки и применения, чем чистый водород, что значительно расширяет возможности его использования. Несомненным плюсом прямых метанольных топливных элементов является отсутствие стадии какого-либо преобразования топлива, которая предшествует выработке электроэнергии, а в обратных метанольных топливных элементах, как раз за счет присутствия этой преобразовательной стадии, значительно повышается эффективность выработки энергии. Поэтому метанольные топливные элементы успешно зарекомендовали себя как для применения в мобильных теле-

фонах и других товарах широкого потребления, так и в двигателях автомобилей, на что и нацелено их будущее использование.

Однако несмотря на большое количество плюсов, есть и минусы. Один из главных минусов заключается в том, что метанол способен просачиваться через мембрану, поэтому эффективность метанольных топливных элементов при больших объемах топлива невелика, что делает их применение в некоторых сферах невозможным. Стоимость протонно-обменной мембраны очень высока, кроме этого, в качестве катализатора используют драгоценный металл – платину, что значительно сказывается на денежном вопросе производства данных топливных элементов.

На сегодняшний день развитие этого направления технических решений не стоит на месте и имеет огромный потенциал для перехода в уже недалеком будущем от двигателей внутреннего сгорания к экологически чистым видам двигателей, особенно на фоне серьезной мировой проблемы, связанной с загрязнением окружающей среды.

Список литературы

1. Топливные элементы: экскурс в будущее. – URL: http://xdrv.ru/articles/technologies/36/full (дата обращения: 19.11.2016).

2. Топливные элементы: виды и принцип работы // econet. – URL: http://econet.ru/articles/86640-toplivnye-elementy-vidy-i-printsip-raboty (дата обращения: 19.11.2016).

3. Топливные элементы: год надежд // compress. – URL: http://compress.ru/article.aspx?id=9652 (дата обращения: 19.11.2016).

4. Как устроен топливный элемент // best-energy. – URL: https://best-energy.com.ua/support/battery/bu-210 (дата обращения: 19.11.2016).

5. Fuel Cells: Low Temperature (Energy Engineering) // what-when-how. – URL: http://what-when-how.com/energy-engineering/fuel-cells-low-temperature-energy-engineering/ (дата обращения: 19.11.2016).

Methanol Fuel Cells: Features, Advantages and Disadvantages

The article overviews the basics of operation of methanol-based fuel cells, their performance characteristics and development prospects.

Keywords: fuel cell; methanol; alternative energy source; chemical source of electrical energy

УДК 681.51, 662.76, 662.9

Л. О. Долгачева, магистрант
В. А. Глушков, кандидат технических наук, доцент
E-mail: Lidochka_LEDY@inbox.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Система управления нагревателем пиролизной установки

Описано устройство управления нагревателем пиролизной установки. Для устройства был выбран наиболее подходящий вариант схемотехнического решения, а именно: подобраны микросхемы и симисторы, удовлетворяющие заданным требованиям. Приводится выбор и обоснование схемы электрической структурной и принципиальной, обоснована конструкция и выбор элементов.

Ключевые слова: альтернативные источники энергии; система управления; пиролиз; пиролизная установка; симистор

В современном мире с растущими показателями потребления, и как следствие – ограниченными энергоресурсами, стремительные обороты набирает развитие технологий добычи энергии из альтернативных, возобновляемых источников [1].

Альтернативная энергия – это энергия, источник которой отличается от тех, что мы привыкли использовать (газ, ядерное топливо, нефть и т. п.). Альтернативный источник энергии заменяет собой традиционные источники энергии, функционирующие на нефти и добываемом природном газе, которые при сгорании выделяют в атмосферу углекислый газ, способствующий росту парникового эффекта и глобальному потеплению.

В настоящее время существуют сотни теорий и разработок по созданию и использованию новых, необычных альтернативных источников энергии, в основе которых возможность использования растительного сырья в качестве альтернативного источника энергии и повышение эффективности переработки растительного сырья в энергоносители. Одно из таких устройств, основанное на принципе пиролиза, было разработано кандидатом технических наук, доцентом кафедры «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова Глушковым Владимиром Александровичем [2].

© Долгачева Л. О., Глушков В. А., 2017

Одной из частей пиролизной установки является корпус реакционной камеры и газоотвода, в которую помещают угольный слой и нагревают его для проведения реакции. Самый очевидный вариант обеспечить равномерное прогревание угля в пиролизной установке – это распределить электроды по периметру контакта, на которые подавать нагревающие напряжения [2].

Данное устройство предназначено для автоматизированного управления угольным нагревателем пиролизной установки. При выполнении определенных условий, например, при достижении определенной величины тока через проводник, устройство управления питанием отключает питающее напряжение от работающего электрода и подает его на соседний, стоящий по порядку [2]. Далее процесс повторяется.

Габаритные размеры и масса устройства зависят от силовых элементов, в данном случае симисторов. Чтобы нагреть электрод, необходим очень большой ток, проходящий через симистор, и соответственно электрод в диапазоне от 150 до 200 ампер. Также в связи с нагревом симисторов возникает необходимость в организации отвода от них тепла, т. е. необходимо установить радиаторы. Все это влияет на массу и габаритные размеры устройства.

Структурная схема установки состоит из трех, связанных между собой блоков (рис. 1): датчика тока, блока управления и блока силовых ключей, а также блока питания.

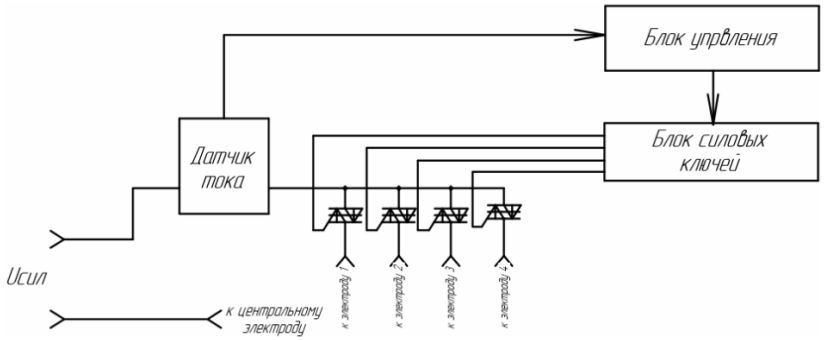


Рис. 1. Схема электрическая структурная

Структура устройства включает в себя устройство управления, выполненное на микроконтроллере PIC16C71. Микроконтроллер включает в себя встроенный восьмиразрядный аналого-цифровой преобразователь. Размер программируемой памяти микроконтроллера состав-

ляет 128 Кб, также микроконтроллер может измерять уровни сразу четырех аналоговых напряжений, после чего преобразовывать их в цифровой вид и обрабатывать полученный результат. Максимальная тактовая частота составляет 4 МГц [3].

Блок ключей представляет собой ряд диодных оптронов и симисторов. К устройству подключается датчик тока, который измеряет величину тока в диапазоне до 200 ампер.

В структурной схеме предусмотрен блок питания, который должен обеспечивать питанием +5 В микросхемы и другие ЭРЭ разрабатываемого устройства.

Принцип работы устройства заключается в том, что интегральный датчик тока получает информацию о силе тока в проводнике и передает его на блок управления, в качестве которого выступает микроконтроллер PIC16C71 со встроенным аналого-цифровым преобразователем. Аналоговый сигнал, полученный от интегрального датчика тока, преобразуется в цифровой вид. Затем этот же микроконтроллер обрабатывает уже цифровой сигнал, где он сравнивается с эталоном, который заложен в памяти микроконтроллера. Далее, если ток проводника превышает эталонный, то сигнал поступает на блок управления электронными силовыми ключами, выполненный из ряда диодных оптронов и симистров. Электронный силовой ключ, в свою очередь, управляет работой силового элемента (симистора), стоящего в цепи нагревателя. При этом ток нагрева IСИЛ течет только через соответствующий позиционному коду симистор, а значит, электрод. Таким образом, ток через нагреватель течет циклически по периметру контакта последовательно через каждый электрод. Блок питания обеспечивает питание устройства. Данный блок питания реализован на диодном мосте VD1 и на стабилизаторе, рассчитан на 5 В для получения стабильного напряжения и тока.

Глядя на схему электрическую структурную (рис. 1), определим элементы схемы электрической принципиальной.

Датчик тока состоит из микросхемы DA2, которая является непосредственно интегральным датчиком тока, конденсатора C8 и RC-фильтра на конденсаторе C9 и резисторе R6 (рис. 2).

Блок управления состоит из следующего набора элементов (рис. 3):

– разъема X3, который соединяет между собой два блока: блок питания и блок управления;

– микроконтроллера DD1, который является «мозгом» системы и берет на себя основные функции управления; данный микроконтроллер включает в себя встроенный АЦП-преобразователь, поэтому

данная микросхема является еще и устройством преобразования аналогового сигнала в цифровой;

– кварцевого резонатора BQ1, резистора R5 и конденсаторов C6 и C7, которые используются в качестве задающих частоту элементов;

– резисторов R3 и R4, являющимися опорными сопротивлениями;

– конденсаторов C4 и C5, создающими дополнительную фильтрацию напряжения питания.

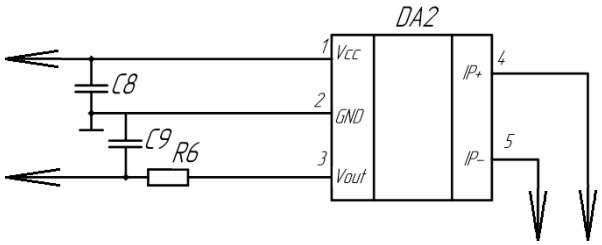


Рис. 2. Схема подключения датчика тока

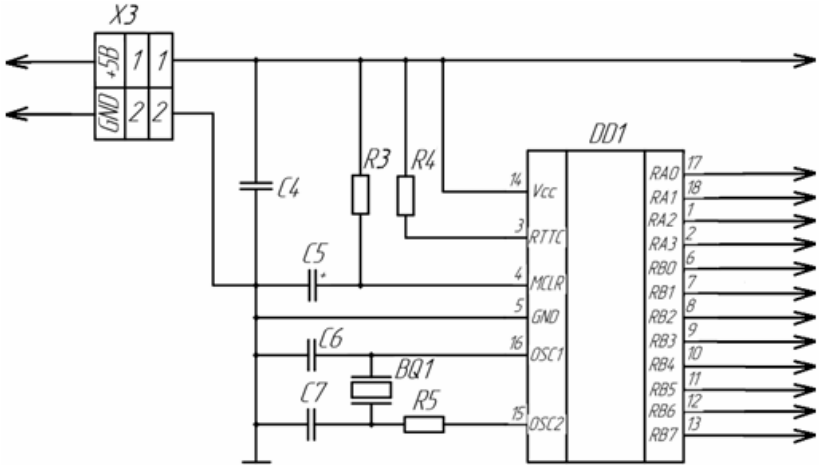


Рис. 3. Схема подключения микроконтроллера (блок управления)

Блок силовых ключей состоит из следующих компонентов (рис. 4):

– силовых симисторов VS1…VS4, которые при получении «сигнала» запускают работу исполнительных устройств, т. е. электродов;

– оптопар симисторных U1…U4, с помощью которых производится потенциальная развязка между силовой и управляющей частями схемы;

– резисторов R7…R10, которые являются опорными, и резисторов R11…R18, являющимися ограничивающими ток резисторами;

– разъемов X4…X8, обеспечивающих подключение электродов к симисторам.

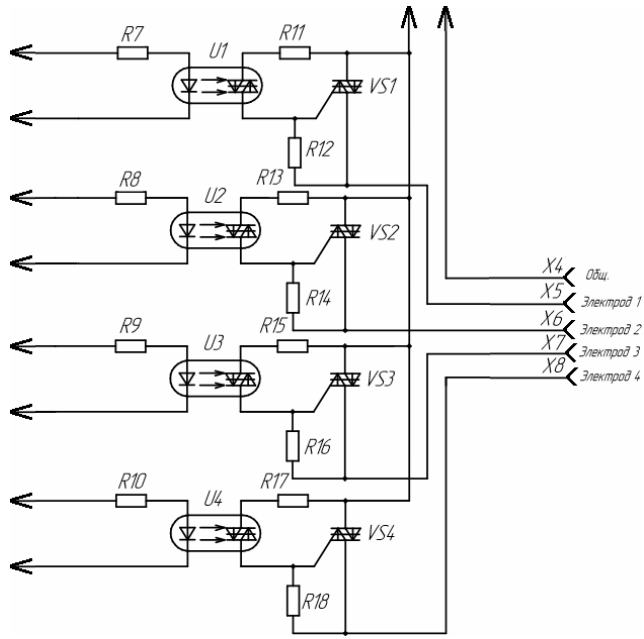


Рис. 4. Принципиальная схема блока силовых ключей

Блок питания состоит из следующей группы элементов (рис. 5):

– разъема X1, используемого для подключения в сеть 220В;

– предохранителя FU1;

– трансформатора T, преобразующего сетевое питание 220В в низковольтное;

– диодного моста VD1, преобразующего переменное напряжение на входе в постоянное напряжение на его выходе;

– стабилизатора напряжения DA1, который служит для стабилизации напряжения в четко установленное значение; в данном случае напряжение на выходе равно +5 В;

– электролитического конденсатора C2, используемого для сглаживания напряжения после диодного моста VD1, конденсатора C3 – для предотвращения самовозбуждения стабилизатора;

– совокупности элементов резисторов R1 и R2, варистора RU1 и конденсатора C1; предназначены для подавления высоковольтных и высокочастотных сетевых помех.

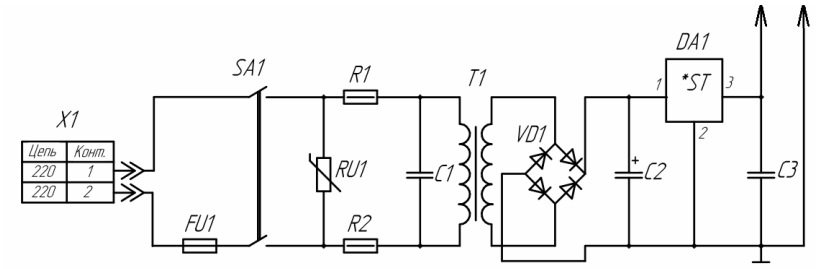


Рис. 5. Принципиальная схема блока питания

Выводы

Описанный вариант системы управления угольным нагревателем пиролизной установки позволяет реализовать различные алгоритмы управления – от простого автомата до адаптивных интеллектуальных.

Список литературы

1. *Глушков*, *В. А*. Анализ проблемы поиска альтернативы нефти и природному газу. – Москва ; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2007. – 200 с.

2. Пат. РФ С 1 2291351 RU 7 F23G5/027. Установка пиролиза / Глушков В. А. – № 2005112167/03; заявл. 22.04.2005 // Изобретения. Полезные модели. – 2007. – № 1.

3. *Дитер*, *К*. Измерение, управление и регулирование с помощью PIC-микроконтроллеров. – Киев : МК-Пресс, 2007. – 304 с.

Pyrolysis Plant Heater Control System

The article describes a control system for the pyrolysis plant heater. The structure, the schematics of the device, its components (ICs, triacs etc) and the design are substantiated according to the technical requirements.

Keywords: alternative energy source; control system; pyrolysis; pyrolysis plant; triac

УДК 621.3.088

О. Б. Качалов, кандидат технических наук, доцент
С. А. Якунина, магистрант
Н. П. Ямпурин, доктор технических наук, профессор
Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Методы снижения погрешности измерительных приборов

Ранее было показано, что любая аппроксимирующая зависимость, представленная регрессией или нейросетевой моделью, имеет интервал погрешности обучающих точек, при котором погрешности проверочных точек сравнительно малы. Этот эффект был отмечен в случае, когда на зависимую переменную влияет пять–семь входных переменных. Изменение средней абсолютной погрешности точек обучающей выборки осуществлялось за счет воздействия на состав обучающей выборки. При этом решается задача поиска экстремума погрешности проверочных точек при нескольких переменных. В данной работе решается аналогичная задача для случая, когда одной выходной переменной соответствует одна входная переменная. При этом она решается, как задача многомерной оптимизации. В данной задаче изменяется значение первого столбца каждого эксперимента. Это позволяет увеличить эффект снижения погрешности проверочных точек при одной входной переменной. По данной методике обработаны результаты лабораторного эксперимента. В качестве отклика принята сила тока. Входной переменной является напряжение. Рассматривались варианты постоянных и переменных выборок. При переменной обучающей выборке снижение погрешности проверочных точек существенно больше. Предлагаемая модель измерения параметров радиоэлектронных средств позволит существенно снизить погрешность измерительных приборов в случае любого числа переменных, влияющих на зависимую переменную.

Ключевые слова: измерительные средства; погрешность измерений; многомерная оптимизация

Известно, что без повышения качества измерений невозможен научно-технический прогресс во всех областях человеческой деятельности [1–3]. Более точная измерительная информация позволяет повысить эффективность сложных технологических процессов, успешно развивать микроэлектронику. Повышение качества измерений в науке может привести к важным открытиям. От качества измерительной информации в медицине зависит эффективность лечения больных.

© Качалов О. Б., Якунина С. А., Ямпурин Н. П., 2017

В связи с этим актуальной является работа [4], в которой предлагаются методы снижения погрешностей измерительных приборов.

В работе [4] показано, что любая аппроксимирующая зависимость имеет интервал погрешности обучающих точек, при котором погрешности проверочных точек сравнительно малы. Отмеченный эффект использовался для снижения погрешности измерительных систем, при которых зависимые переменные были откликом на несколько (5–7) входных переменных. При этом имеет место кратное снижение погрешности проверочных точек.

Целью данной работы является оценка снижения погрешности проверочных точек при одной входной переменной. Были использованы результаты лабораторных работ. Математическая модель принята в виде регрессии со свободным членом. При этом в качестве отклика принята сила тока. Входной переменной является напряжение. В табл. 1 представлены данные по обучающей выборке, в табл. 2 – данные по проверочным точкам. При обработке данных лабораторной работы снята экспериментальная зависимость средней абсолютной погрешности проверочных точек от средней абсолютной погрешности обучающих точек (табл. 3, рисунок).

Таблица 1. **Обучающая выборка**

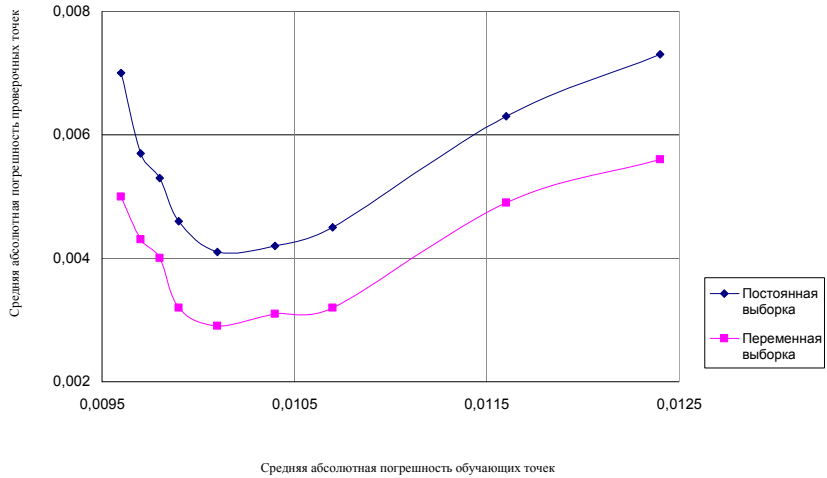
№	Сила тока I,A	Напряжение U,B
1	0,210	5,20
2	0,225	5,60
3	0,235	5,95
4	0,240	6,20
5	0,255	6,40
6	0,260	6,50
7	0,265	6,55

Таблица 2. **Проверочная выборка**

№	Сила тока I,A	Напряжение U,B
1	0,215	5,39
2	0,217	5,40
3	0,231	5,80
4	0,238	6,00
5	0,250	6,28
6	0,258	6,47
7	0,263	6,52

Таблица 3. **Результаты экспериментальных работ**

№ п/п	Средняя абсолютная погрешность точек обучающей выборки	Средняя абсолютная погрешность проверочных точек при постоянной выборке	Средняя абсолютная погрешность проверочных точек при переменной выборке
1	0,0096	0,0070	0,0050
2	0,0097	0,0057	0,0043
3	0,0098	0,0053	0,0040
4	0,0099	0,0046	0,0032
5	0,0101	0,0041	0,0029
6	0,0104	0,0042	0,0031
7	0,0107	0,0045	0,0032
8	0,0116	0,0063	0,0049
9	0,0124	0,0073	0,0056



Зависимость средней абсолютной погрешности проверочных точек от средней абсолютной погрешности обучающих точек

При переменной обучающей выборке каждая проверочная точка имеет свой вектор коэффициентов регрессии. Это дает возможность существенно снизить погрешность проверочных точек по сравнению с погрешностью при постоянной выборке. В данном случае снижение погрешности обусловлено изменением состава обучающей выборки. При этом к основному ядру обучающей выборки присоединяется проверочная точка, для входных данных которой рассчитывается выходной показатель. Далее данная проверочная точка удаляется из обу-

чающей выборки, а на ее место поступает следующая проверочная точка, для которой также рассчитывается выходной показатель и т. д. Как видно из приведенного рисунка, имеют место низкие значения средней абсолютной погрешности проверочных точек при погрешностях обучающих точек 0,0101–0,0104. Средняя абсолютная погрешность проверочных точек при этом составляет для постоянной выборке 0,0041–0,0042 и для переменной выборки 0,0029–0,0031

Изменение средней абсолютной погрешности точек осуществлялось за счет изменения состава обучающей выборки. При этом могут быть случаи увеличения и уменьшения количества точек. Рассматривался вариант нахождения экстремума в случае многомерной функции. За переменные в данном случае принимались члены первого ряда матрицы обучающей выборки. В первом ряду обучающей матрицы выбиралось несколько значений напряжения стабилизации. В данных одного эксперимента это значение изменялось, и при этом средняя абсолютная погрешность проверочных точек уменьшалась. Далее аналогичная процедура применялась к другой выбранной величине. Расчеты продолжались до тех пор, пока не была достигнута необходимая величина снижения погрешности проверочных точек. Здесь важно подчеркнуть, что, воздействуя на обучающую выборку, мы получаем снижение погрешности проверочных точек в определенном интервале погрешности точек обучающей выборки. При этом в интервалах сравнительно больших и малых погрешностей точек обучающей выборки имеют место большие ошибки проверочных точек.

Результаты исследования показывают, что если выходной переменной соответствует одна входная переменная, то так же, как и в случае нескольких входных переменных, имеет место существенное снижение погрешности проверочных точек в определенном интервале погрешности точек обучающий выборки

Результаты исследований могут быть использованы при калибровке датчиков, измерительных систем и комплексов в технике, экологии и медицине.

Список литературы

1. *Золотаревский*, *С. Ю.* Опыт NIST по изучению измерительных потребностей современных инновационных технологий // Законодательная и прикладная метрология. – 2007. – № 6. – С. 5–7.

2. *Заико*, *Н. А*. Комплексный подход к оценке погрешностей в задаче численного анализа данных натурного эксперемента : автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.13.18 / Н. А. Заико. – Уфа, 2008. – 16 с.

3. *Заико, А. И.* Состояние и перспективы комплексного подхода к определению погрешностей измерений // Вестн. Уфим. гос. авиационного техн. ун-та, 2007. – № 6. – С. 23–32.

4. *Качалов, О. Б.* Методы снижения погрешности аппроксимирующих зависимостей / О. Б. Качалов, Н. П. Ямпурин // АНТЭ–2013 : Междунар. науч.-техн. конф : сб. докл. – Казань, 2013. – С. 200–203.

Methods to Reduce the Error of Measuring Instruments

Previously it was shown that any approximating dependence, presented in the form of a regression or neural network, has interval error of the training points, wherein the error of the test points is relatively small. This effect was observed in the case when the dependent variable is affected by five to seven input variables. The average absolute error of the points in the training sample was carried out by acting on the composition of the training sample. This solved the problem of search of extremum of the test points in several variables. In this paper solves a similar problem for the case when one output variable corresponds to one input variable. While it is solved as a problem of multidimensional optimization. In this task changes the value of the first column in each experiment. This allows to increase the effect of reducing the error of the test points for one input variable. According to this method, the processed results of the laboratory experiment. As a response adopted by the current. The input variable is voltage. Discussed options for fixed and variable samples. With variable training sample reduction in error of the test points is much larger. The proposed model of measurement of parameters of radio-electronic means will significantly reduce the error of measuring instruments in the case of any number of variables that affect the dependent variable.

Keywords: measuring gear; instrument measurement accuracy; multivariable optimization

УДК 620.17:658.56

П. Л. Кузнецов, главный метролог
E-mail: pavellk@mail.ru
ОАО «Элеконд»
В. А. Кузнецова, аспирант
E-mail: vklynch@mail.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Анализ электрических параметров танталовых объемно-пористых (оксидно-электролитических) конденсаторов на основе физико-химических процессов и схем их замещения

Проведен анализ электрических параметров с помощью физико-химических процессов танталовых объемно-пористых (оксидно-электролитических) конденсаторов и схем замещения.

Ключевые слова: тантал; конденсаторы; электрические параметры; схема замещения; процессы

Среди конденсаторов с оксидным диэлектриком [1], таких как алюминиевые [2], танталовые и ниобиевые конденсаторы, наиболее надежными и пригодными для жестких условий эксплуатации являются танталовые конденсаторы.

До последнего времени улучшение массогабаритных характеристик таких конденсаторов основывалось на применении все более мелкодисперсных танталовых порошков, имеющих более развитую поверхность и, соответственно, более высокий исходный удельный заряд. Так, если в конце прошлого века наиболее распространенными были порошки с удельным зарядом порядка единиц тысяч мк · Кл/г, то в современных танталовых порошках удельный заряд превышает 100 тыс. мк · Кл/г. К сожалению, промышленное производство танталовых порошков в России вообще отсутствует.

Однако проблема дальнейшего развития танталовых конденсаторов [3, 4] определяется не только и не столько необходимостью повышения их удельного заряда, сколько необходимостью качественного улучшения частотных характеристик емкости, т. к. для этих конденсаторов характерно существенное снижение емкости с ростом частоты приложенного напряжения.

© Кузнецов П. Л., Кузнецова В. А., 2017

Это определяется самой физической природой образования емкости на развитой поверхности объемно-пористого тела. Причина возникновения этого явления поясняется схемой конденсаторов с объемно-пористым анодом (рис. 1).

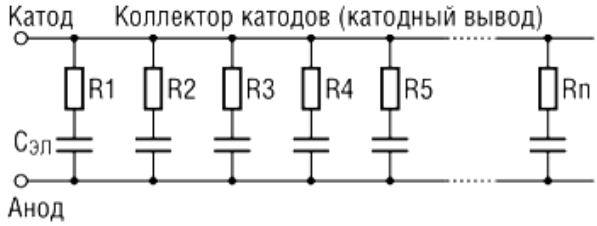


Рис. 1. Электрическая схема объемно-пористого (оксидно-электролитического) конденсатора

Общая емкость такого конденсатора складывается из параллельно соединенных емкостей отдельных зерен спрессованного объемно-пористого тела с расположенным в его центре анодным выводом. При этом аноды элементарных емкостных элементов соединяются с анодным выводом конденсатора через низкоомные контакты между зернами спрессованного и спеченного объемно-пористого тела, а их катоды соединяются с катодным выводом конденсатора тонкими слоями электролита в порах (электролитические конденсаторы). Относительно большое сопротивление таких катодных соединений приводит к тому, что постоянные времени релаксаторов, образуемых отдельными элементарными конденсаторами, возрастают по мере удаления последних от катодного вывода и вносят все более заметный вклад в частотную характеристику емкости конденсатора.

К сожалению, физика этого явления такова, что частотная зависимость емкости ухудшается с ростом удельного заряда используемых порошков и, соответственно, удельного заряда конденсаторов. Поэтому применение малогабаритных конденсаторов становится все менее эффективным в современной высокочастотной аппаратуре.

Расчет безопасных режимов работы конденсаторов подразумевает определение уровней допустимых напряжений и токов. Для этого расчета потребуется использование основных параметров танталовых конденсаторов.

К основным параметрам объемно-пористых (оксидно-электролитических) конденсаторов относят [5–7]:

1. Номинальная емкость.

Танталовые конденсаторы объемно-пористые (оксидно-электролитические) конденсаторы имеют высокую удельную емкость, что объясняется достаточно просто. Как известно, емкость конденсатора определяется по формуле

$$C = \frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (1)$$

где ε_r – диэлектрическая проницаемость материала; ε_0 – электрическая постоянная; S – площадь электродов; d – толщина диэлектрика.

Диэлектрик (Ta_2O_5) имеет высокое значение диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 26$. Кроме того, сама по себе поверхность анода в структуре конденсатора является гранулированной и имеет большую площадь. В результате емкость танталовых конденсаторов составляет сотни и тысячи микрофарад.

2. Номинальное напряжение.

В России современные танталовые объемно-пористые (оксидно-электролитические) конденсаторы выпускаются на номинальные напряжения до 200 В. Следует отметить одну особенность данного параметра: для нормального функционирования в составе различных устройств танталовые конденсаторы должны использоваться при напряжениях, меньших, чем номинальное. Это правило появилось в 50-е годы и было связано с особенностями военной приемки танталовых конденсаторов и установленными тогда же процедурами определения надежности.

3. Полное сопротивление (импеданс).

Как известно, эквивалентная схема объемно-пористого (оксидно-электролитического) конденсатора (рис. 2), кроме емкостной составляющей, содержит ряд дополнительных элементов:

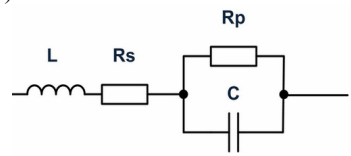


Рис. 2. Эквивалентная схема объемно-пористого (оксидно-электролитического) конденсатора

– индуктивную составляющую (L), которая учитывает индуктивность выводов;

– параллельное сопротивление (Rp), которое позволяет учесть ток утечки через диэлектрик и поверхностные токи утечки;

– эквивалентное последовательное сопротивление $R_{экв}$ (*Equivalent Series Resistance*, *ESR*).

Полное сопротивление схемы имеет сложную частотную зависимость (рис. 3). Главной особенностью этой зависимости является тот факт, что с ростом частоты импеданс уменьшается вплоть до мегагерцового диапазона [8]. Это позволяет использовать танталовые конденсаторы в современных источниках питания, работающих на частотах от 100 кГц и выше.

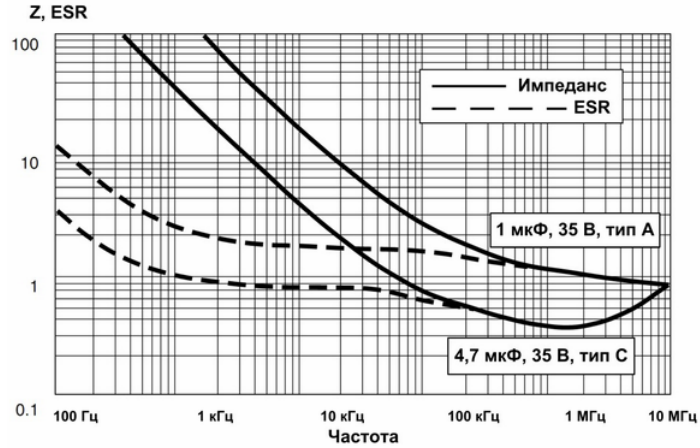


Рис. 3. Типовая частотная зависимость импеданса и $R_{экв}$ (*ESR*) объемно-пористого (оксидно-электролитического) конденсатора

4. Наибольший интерес представляет эквивалентное последовательное сопротивление $R_{экв}$ (*ESR*) коденсатора.

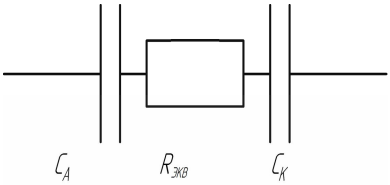


Рис. 4. Простейшая схема замещения объемно-пористого (оксидно-электролитического) конденсатора: C_A – емкость анода; C_K – емкость катода; $R_{экв}$ – эквивалентное последовательное сопротивление

Под эквивалентным последовательным сопротивлением $R_{экв}$ подразумевают суммарное сопротивление выводов конденсатора и его обкладок, а также сопротивление электролита для электролитических конденсаторов. Проведем анализ простейшей схемы замещения объемно-пористого (оксидно-электролитического) конденсатора (рис. 4).

Поскольку роводимость металлов [2, 9–22] во много раз

превышает проводимость электролитов, основной вклад в значение последовательного сопротивления конденсатора будет давать сопротивление электролита (для 38 % H_2SO_4 удельное сопротивление в нормальных условиях составляет 1,36 Ом · см, для тантала в нормальных условиях 0,000012 Ом · см).

Для электролитической ячейки:

$$R_{\text{экв}} = \rho \frac{l}{S_{\text{эл}}}, \tag{2}$$

где ρ – удельное сопротивление электролита; l – толщина слоя электролита; $S_{\text{эл}}$ – геометрическая площадь слоя электролита, контактирующего с обкладками конденсатора.

Из формулы (2) следует, что снижения сопротивления электролита проще всего добиться тремя способами:

– подбором электролита с низким сопротивлением;

– уменьшением толщины слоя электролита (расстояние между обкладками конденсатора);

– увеличением геометрической площади слоя электролита контактирующего с обкладками конденсатора.

Оксид тантала обладает химической стойкостью ко всем неорганическим кислотам, кроме плавиковой. Наименьшим удельным сопротивлением в широком диапазоне температур обладает водный 38%-й раствор серной кислоты, удельное сопротивление в нормальных условиях составляет 1,36 Ом·см, температура замерзания при этой концентрации составляет $t_{\text{пл}} = -62$ ºС, поэтому в качестве рабочего электролита выбран водный 38%-й раствор серной кислоты.

Поскольку анод и катодная поверхность объемно-пористые и пропитаны электролитом [23–29], в некотором приближении будем считать l как расстояние между поверхностью анода и танталовой суспензией, припеченной к корпусу, а геометрическую площадь $S_{\text{эл}}$ слоя электролита, контактирующую с обкладками конденсатора, примем за боковую поверхность анода:

$$S_{\text{эл}} = \pi \cdot D \cdot H, \tag{3}$$

где D – диаметр анода конденсатора; H – высота анода конденстаора.

При заданном значении емкости объемно-пористого анода, следовательно, заданном значении объема анода, снижение сопротивления электролита можно достичь увеличением длины анода H, т. к. при этом площадь $S_{\text{эл}}$ слоя электролита линейно увеличивается.

Танталовые объемно-пористые конденсаторы обладают рядом значительных преимуществ (высокий удельный заряд и высокая удельная емкость, низкие значения сопротивлений, высокие значения номинальных напряжений – до 200 В, длительный срок службы и широкий диапазон рабочих температур) перед конденсаторами других конструктивных исполнений и из более доступных материалов (например, алюминиевые конденсаторы). Несмотря на некоторые недостатки (увеличение сопротивления и тангенса угла потерь при температурах – 60 ºС – связанного со свойствами электролита, а также высокая стоимость) они нашли широкое применение в следующих областях: космическая промышленность, военная техника и др. (для использования в аппаратуре, работающей в жестких условиях и требующей повышенной стабильности электропараметров).

Выводы

В связи с развитием цифровой техники и увеличением рабочих частот схем с применением танталовых объемно-пористых конденсаторов назревает необходимость уменьшения эквивалентного последовательного сопротивления для обеспечения скорости прохождения сигналов и снижения затухания, что, в свою очередь, выводит этот параметр на одно из первых мест и подчеркивает актуальность – производить тестирование и разбраковку танталовых конденсаторов именно по данному параметру.

Список литературы

1. *Кузнецов*, *П. Л.* Комплексный подход к обеспечению качества при производстве электролитических конденсаторов и ионисторов / П. Л. Кузнецов, В. А. Кузнецова // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке [Электронный ресурс] : электрон. науч. изд. : сб. тр. II Всерос. науч.-техн. конф. асп., магистр. и молодых ученых с междунар. участием (Ижевск, 23–25 апр. 2013 г.). – Электрон. дан. (1 файл : 39,3 Мб.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2013. – 1415 с. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Acrobat reader 6.0 и выше. – ISBN 978-5-7526-0603-8.

2. *Муравьев*, *В. В*. Прогноз качества изделий из сплава АЛ9 / В. В. Муравьев, К. Л. Комаров, А. В. Новиков // Литейное производство. – 1987. – № 10. – С. 8.

3. *Кузнецов*, *П. Л.* Применение стресс-теста при контроле качества оксидно-электролитических конденсаторов // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке [Электронный ресурс] : электрон. науч. изд. : сб. материалов III Всерос. науч.- техн. конф. асп., магистр. и молодых ученых с междунар. участием (Ижевск, 22–23 апр. 2015 г.). – Электрон. дан. (1 файл : 33,2 Mb.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова ; изд-во

«ИННОВА», 2015. – 1010 с. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Acrobat reader 6.0 и выше – ISBN 978-5-9906108-6-6. – С. 308–310.

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

5. 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. – С. 140–143.

6. *Кузнецова*, *В. А.* Надежность танталовых чип-конденсаторов на стадии изготовления в зависимости от качества материалов / В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Приборостроение в XXI веке – 2014. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов X Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / науч. ред. В. И. Заболотских. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2015. – С. 198–203.

7. *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.

8. *Кузнецов*, *П. Л.* Анализ характерных зависимостей импеданса и эквивалентного последовательного сопротивления электролитических конденсаторов от частоты // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : сб. науч. тр. XII Междунар науч-практ конф (19–20 марта 2015 г.) / редкол.: А. А. Горохов (отв. ред.). – В 4 т., Т. 2. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т., 2015. – 383 с. – С. 316–319.

9. *Муравьев*, *В. В.* Погрешности измерений при ультразвуковой структуроскопии // Дефектоскопия. – 1988. – № 7. – С. 80–82.

10. *Теодорович*, *С. Б.* Активные технические системы на основе материалов и конструкций с управляемыми свойствами / С. Б. Теодорович, С. М. Кулаков, В. В. Муравьев // Изв. высш. учеб. завед. – Сер. «Черная металлургия». – 2001. – № 2. – С. 63–68.

11. *Teodorovich*, *S. B.* Active systems based on materials and structures with controllable properties / S. B. Teodorovich, S. M. Kulakov, V. V. Muravev // Steel in Translation. – 2001. – Т. 31. – № 2. – С. 74–79.

12. *Муравьев*, *В. В.* Анализ факторов, влияющих на результаты контроля зеркально-теневым методом / В. В. Муравьев, О. В. Коробейникова, М. Б. Кадикова // Дефектоскопия. – 2007. – № 9. – С. 44–54.

13. *Muravev*, *V. V.* Analysis of factors affecting the results of testing via the mirror-shadow method / V. V. Muravev, O. V. Korobeinikova, M. B. Kadikova // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2007. – Т. 43. № 9. – С. 597–604.

14. *Муравьев*, *В. В.* Анализ погрешностей определения координат источников акустической эмиссии в конструкциях из листовой стали / В. В. Муравьев, С. А. Бехер, К. В. Власов // Дефектоскопия. – 2008. – № 7. – С. 53–59.

15. *Muravev*, *V. V.* Analysis of errors in determining the coordinates of acoustic-emission sources in sheet-steel structures / V. V. Muravev, S. A. Bekher, K. V. Vlasov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2008. – Т. 44. № 7. – С. 480–485.

16. Анализ сравнительной достоверности акустических методов контроля пруткового проката из рессорно-пружинных сталей / В. В. Муравьев [и др.] // Дефектоскопия. – 2014. – № 8. – С. 3–12.

17. An analysis of the comparative reliability of acoustic testing methods of bar stock from spring steels / V. V. Murav'ev, O. V. Murav'eva, V. A. Strizhak, A. V. Pryakhin, E. N. Fokeeva // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – Т. 50. № 8. – С. 435–442.

18. Критерии оценки технического состояния длительно работающего металла оборудования ТЭС на основе акустической структуроскопии / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, В. В. Муравьев, С. В.Фольмер // Дефектоскопия. – 2015. – № 2. – С. 44–51.

19. Criteria for the evaluation of the technical state of the long-lived metal of HPP equipment based on acoustic structuroscopy / A. N. Smirnov, N. V. Ababkov, V. V. Murav'ev, S. V. Fol'mer // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Т. 51. № 2. – С. 94–100.

20. Оценка степени опасности дефектов при АЭ-контроле металлических конструкций / В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова, Е. Ю. Лебедев, А. Е. Кареев // Дефектоскопия. – 2002. – № 8. – С. 44–52.

21. Assessment of hazard due to flaws in metallic structures detected by the AE method / V. V. Muravev, L. N. Stepanova, E. YU. Lebedev, A. E. Kareev // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2002. – Т. 38. № 8. – С. 593–599.

22. *Муравьев*, *В. В*. Сравнительная достоверность акустико-эмиссионного контроля боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагоно // В мире неразрушающего контроля. – 2014. – № 3. – С. 30–33.

23. *Кузнецова*, *В. А*. Исследование надежности танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов на основе экспериментальных данных / В. А. Кузнецова, П. Л. Кузнецов, В. В. Муравьев // Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 3(59). – С. 88–91.

24. *Беляева*, *Е. А*. Исследование влияния срока сохраняемости на эксплуатационные характеристики и состояние объемно-пористых танталовых конденсаторов / Е. А. Беляева, В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 1(23). – С. 96–99.

25. *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.

26. *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.

27. *Кузнецова*, *В. А*. Влияние конструктивных характеристик анода на эксплуатационные параметры оксидно-полупроводниковых танталовых чип-конденсаторов / В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та. – 2014. – № 4(64). – С. 105–107.

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

29. *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.

Analysis of electrical parameters of tantalum electrolytic capacitors on the basis of physico-chemical processes and equivalent circuit

The analysis of electrical parameters using physico-chemical processes tantalum electrolytic capacitors and the equivalent circuit.

Keywords: tantalum; capacitors; electrical parameters; equivalent circuit; processes

УДК 004.942

М. А. Подсизерцев, магистрант
E-mail: podsizertsev@ya.ru
С. Г. Дулесов, инженер
П. А. Ушаков, доктор технических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Концепция синтеза элементов с фрактальным импедансом на основе шестиполюсных *RC*-ЭРП

Рассматриваются недостатки существующих методов синтеза элементов с фрактальным импедансом, предлагается концепция синтеза двумерных шестиполюсных структур.

Ключевые слова: *RC*-ЭРП; анализ и синтез

Введение

Элементы с фрактальным импедансом (ЭФИ) описываются компонентным уравнением вида

$$Z_{(p)} = \frac{1}{p^{\alpha} C_{\alpha}},$$

где p – комплексная частота; C_{α} – фрактальная емкость элемента $[(\text{рад/с})^{-\alpha}\cdot\text{Ом}^{-1}]$; α – дробный порядок фрактального элемента.

В работах [1–2] предложен и реализован способ создания ЭФИ, основанный на синтезе двухполюсников, содержащих четыре однородных *RCNR*-линии. Каждая из *RCNR*-линий характеризуется матрицей *y*-параметров, коэффициенты которой записаны в виде аналитических выражений. Это позволило создать программу синтеза, в которой целевая функция вычисляется с использованием этих аналитических выражений.

В работе [3] предложен резистивно-емкостной элемент с распределенными параметрами (*RC*-ЭРП), конструкция которого изображена на рис. 1. Элемент содержит шесть выводов за счет разделения одного из резистивных слоев на две части. В дальнейшем такой элемент будем называть резистивно-емкостным элементом с распределенными параметрами со структурой слоев вида (*R*1 + *R*2)-*C*-*NR* (сокращенно, (*R*1 + *R*2)-*C*-*NR*-ЭРП). Представляется, что использование такой кон-

© Подсизерцев М. А., Дулесов С. Г., Ушаков П. А., 2017

струкции при синтезе двухполюсника с фрактальным импедансом позволит уменьшить количество требуемых элементов и улучшить его основные параметры.

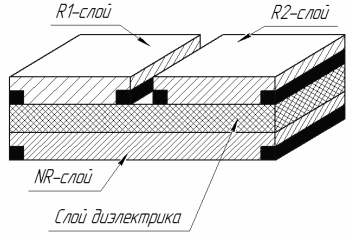


Рис. 1. Конструкция (*R*1 + *R*2)-*C*-*NR*-элемента с распределенными параметрами

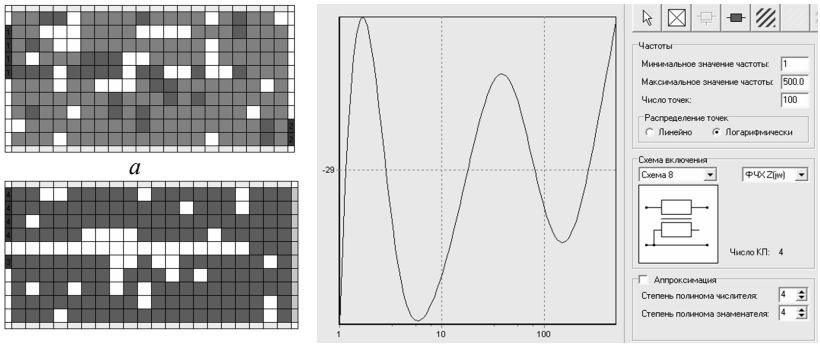
Однако в отличие от *RCNR*-линии новая шестиполюсная конструкция уже не является линией, т. к. распределение потенцилов в резистивных слоях имеет двумерный характер. Для такой конструкции нет аналитических выражений коэффициентов матрицы проводимости. Поэтому способ синтеза ЭФИ, предложенный в работах [4, 5], в этом случае не может быть реализован.

Для синтеза двумерных ЭФИ на основе *RC*-ЭРП на кафедре разработана программа *RCWorkbench* [6], использующая метод конечных распределенных элементов [5]. Благодаря этому и методу оптимизации на основе генетических алгоритмов можно найти топологию двумерного ЭФИ по заданным параметрам. Пример топологии двумерного ЭФИ на основе *RC*-ЭРП со структурой слоев вида *RCNR*, реализующего $\alpha = 0{,}32$ в диапазоне нормированных частот в 2,7 декады, изображен на рис. 2.

Программа *RCWorkbench* позволяет создать топологическую модель (*R*1 + *R*2)-*C*-*NR*-ЭРП, как показано на рис. 3, *а* и на основе этой модели рассчитать массив значений *y*-параметров шестиполюсника во всем диапазоне заданных частот (рис. 3, *б*).

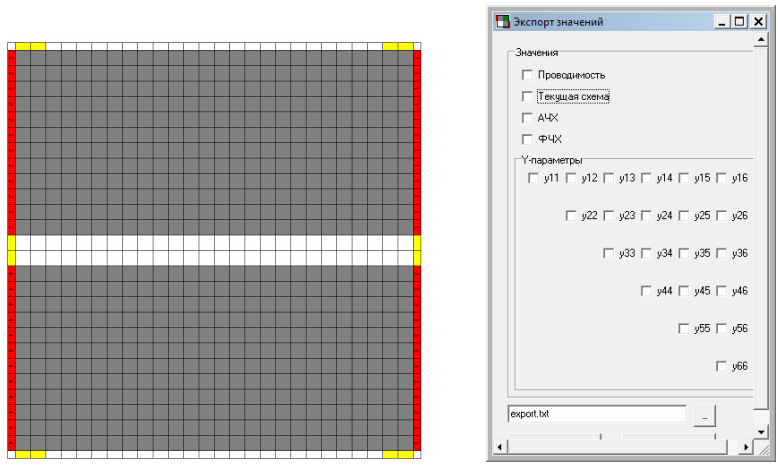
Однако значений *y*-параметров недостаточно для синтеза ЭФИ. Их можно использовать лишь для анализа частотных характеристик (*R*1 + *R*2)-*C*-*NR*-ЭРП, используя какой-либо математический пакет или специализированный модуль расчета частотных характеристик [3].

Целью данной работы является создание концеции синтеза ЭФИ на основе (*R*1 + *R*2)-*C*-*NR*-ЭРП, в которой бы сочетались возможности анализа двумерных *RC*-ЭРП методом конечных распределенных элементов и алгоритмы синтеза ЭФИ, реализованные в работе [5].



а *б* *в*

Рис. 2. Двумерный ЭФИ на основе RC-ЭРП со структурой слоев вида RCNR: *а* – топология слоя *R*; *б* – топология слоя *NR*; *в* – ФЧХ импеданса ЭФИ при заданной схеме включения



а *б*

Рис. 3. (*R*1 + *R*2)-*C*-*NR*-ЭРП:
а – топология верхнего резистивного слоя; *б* – форма для вывода значений *y*-параметров

Основной недостаток программы синтеза двумерных ЭФИ заключается в том, что схема двухполюсного включения многополюсного элемента выбирается пользователем из списка возможных или рекомендованных вариантов. Это не позволяет проводить синтез ЭФИ на

основе нескольких *RC*-ЭРП, что заметно снижает диапазон реализуемых значений показателя α и диапазон частот, в пределах которого значение α остается постоянным.

Представляется, что этот недостаток можно устранить, если схему включения создавать в специальном модуле, содержащем графический редактор и программу вычисления целевой функции, автоматически формируемой в соответствии с созданной схемой включения. Однако количество различных вариантов двухполюсного включения даже для одного шестиполюсника достигает нескольких тысяч [3]. Очевидно, что при синтезе ЭФИ на основе нескольких шестиполюсников, это количество возрастет на несколько порядков. Поэтому нужен модуль автоматизированного поиска схемы включения, отвечающей определенным требованиям. Назовем его модулем структурного синтеза.

Следующий этап синтеза – это параметрический синтез, в процессе реализации которого определяются удельные параметры резистивных и диэлектрических материалов *RCNR*-структуры и геометрические параметры каждого из (*R*1 + *R*2)-*C*-*NR*-ЭРП, используемого в синтезе.

Заключительным этапом программы синтеза является создание топологии ЭФИ в виде конструктивно законченного трехслойного элемента на основе данных, полученных на этапах структурного и параметрического синтеза.

Блок-схема программы синтеза ЭФИ на основе (*R*1 + *R*2)-*C*-*NR*-ЭРП представлена на рис. 4.

Рис. 4. Блок-схема программы синтеза ЭФИ на основе (*R*1 + *R*2)-*C*-*NR*-ЭРП

Список литературы

1. *Ушаков*, *П. А*. Математические модели RC-элементов с распределенными параметрами со структурой слоев вида R-CG-NR / П. А. Ушаков, К. В. Красноперов, А. В. Филиппов // Вестник ИжГТУ. – 2008. – № 2. – С. 54–57.

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

3. *Подсизерцев*, *М. А*. Анализ характеристик шестиполюсного *R-C-NR*-ЭРП при различных двухполюсных схемах включения / М. А. Подсизерцев, П. А. Ушаков // Приборостроение в XXI веке – 2015. Интеграция науки, образования и производства (Ижевск, 25–27 нояб. 2015 г.) : сб. материалов XI Междунар. науч.-техн. конф. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. – С. 134–140.

4. *Ушаков*, *П. А.* Разработка генетического алгоритма для синтеза конструкций фрактальных элементов на основе резистивно-емкостной среды со структурой слоев вида R-C-NR / П. А.Ушаков, К. О. Максимов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2012. – № 3. – С. 104–108.

5. *Гильмутдинов*, *А. Х*. Моделирование фрактальных процессов и объектов методом обобщенных конечных распределенных элементов / А. Х. Гильмутдинов, П. А. Ушаков // Нелинейный мир. – 2008. – Т. 6. № 2. – С. 114–120.

6. Программа синтеза конструкции резистивно-емкостных элементов с распределенными параметрами : св-во о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2010612900 / правообладатель А. В. Филиппов ; авторы А. В. Филиппов, П. А. Ушаков, К. В. Красноперов. Зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 28 апр. 2010 г.

The Concept of Synthesis of Hexapole RC-EDP Based Elements with a Fractal Impedance

This paper describes the limitations of the existing fraction impedance elements synthesis methods and suggests two-dimensional hexapole structure synthesis concept.

Keywords: RC-EDP; analysis and synthesis

УДК.621.398 + 621.376.9

А. Р. Садыков, начальник конструкторского бюро
Ю. Г. Тугбаев, инженер-конструктор
Д. С. Лучкин, инженер-конструктор
А. В. Байтеряков, инженер-конструктор
E-mail: albik@irz.ru
Акционерное общество «Ижевский радиозавод», г. Ижевск

Создание перспективной бортовой аппаратуры командно-измерительной системы стандарта *ESA/CCSDS*

Представлены результаты работ по созданию перспективной бортовой аппаратуры командно-измерительной системы стандарта ESA/CCSDS с учетом импортозамещения.

Ключевые слова: командно-измерительная система; модуль интерфейсный; приемопередающее устройство; командная радиолиния

В настоящее время в России действуют два ведомственных стандарта организации командной радиолинии управления космическим аппаратом (КА). Оба стандарта имеют закрытый формат.

Международные космические структуры для своей работы по организации командной радиолинии управления КА применяют открытые, рекомендованные стандарты *ESA/CCSDS*.

Цель данной работы: создание бортовой аппаратуры командно-измерительной системы (КИС) для организации командной радиолинии стандарта *ESA/CCSDS*.

Бортовая аппаратура командно-измерительной системы (*БА КИС*)

Структурная схема БА КИС представлена на рис. 1. Основные технические характеристики БА КИС приведены в табл. 1.

По техническому заданию на составную часть опытно-конструкторской работы «Модуль интерфейсный для бортовой аппаратуры командно-измерительной системы» № 775С.ТЗ 220-3412-14 (совместные работы с ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет») АО «Ижевский радиозавод» были разработаны и изготовлены опытный образец модуля интерфейсного командно-измерительной системы (МИ КИС) и опытный прибор приемо-передающее устройство (ППУ).

© Садыков А. Р., Тугбаев Ю. Г., Лучкин Д. С., Байтеряков А. В., 2017

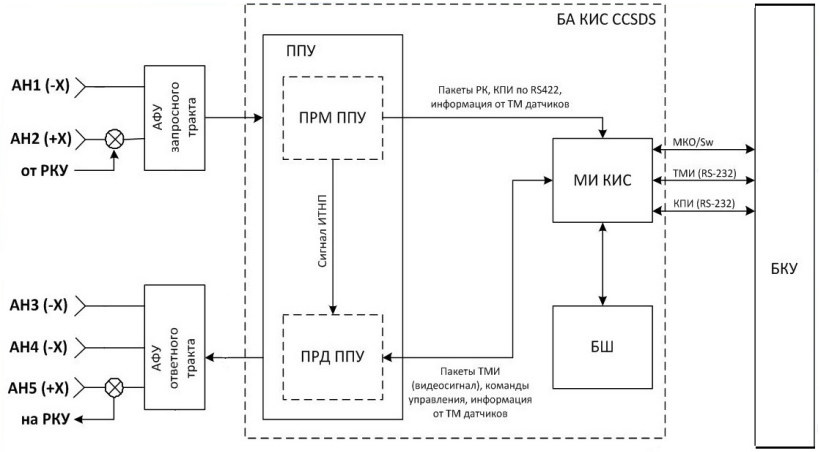


Рис. 1. Структурная схема БА КИС *CCSDS*

Таблица 1. **Основные технические характеристики БА КИС *CCSDS***

Характеристика	Значение
Скорости передачи информации: – запросный канал – ответный канал	 1000 бит/с 1000/8000/32000 бит/с
Вероятность ошибки на бит	Не менее 10^{-6}
Виды модуляции: – запросный канал – ответный канал	 ИКМ/ДФмн/ЧМ ИКМ/ДФмн/ФМ
Динамический диапазон приемника	От минус 142 до минус 90 дБВт
Выходная мощность передатчика	Не менее 8 Вт (на конец САС)
Количество принимаемых от наземной станции команд: – РКБКУ – РККИС	 256 64

Модуль интерфейсного КИС предназначен для использования в составе БА КИС для реализации протоколов обмена командной и телеметрической информацией между наземным комплексом управления и системами КА с использованием протоколов стандарта *ESA* или их модифицированных версий.

Модуль интерфейсного КИС реализует следующие функции:

– прием (по нескольким входам) команд управления и командно-программной информации (КПИ) от приемного устройства;

– декодирование пакета телекоманд в соответствии со стандартом пакетных телекоманд ESA-PSS-04-107 [1] (ECSS-E-ST-50-04C [2]);

– выполнение процедур преобразования информации для выдачи в модули МИ КИС, управление работой модулей МИ КИС, контроль состояния МИ КИС;

– выдача команд управления на аппаратуру КИС;

– передачу декодированных команд управления и КПИ в бортовой комплекс управления (БКУ);

– коммутацию электропитания приборов БА КИС и МИ КИС;

– генерацию заданных последовательностей команд по внешним командам управления;

– формирование телеметрического кадра с данными о состоянии БА КИС, МИ КИС и полученной телеметрической информации (ТМИ) от БКУ в пакетную телеметрию в соответствии со стандартом ESA-PSS-04-106 [3] (ECSS-E-ST-50-03C [4]);

– формирование и кодирование полного пакета ТМИ в соответствии с ESA-PSS-04-106 [3] (ECSS-E-ST-50-03C [4]) и выдачу его в передающее устройство КИС в виде модулированного сигнала.

Основные тактико-технические характеристики МИ КИС приведены в табл. 2, внешний вид МИ КИС представлен на рис. 2.

Таблица 2. **Основные тактико-технические характеристики МИ КИС**

Характеристика	Значение	Примечание
Напряжение питания, В	От 23 до 32	
Потребляемая мощность, Вт, не более	8,0	
Интерфейсы С ППУ С аппаратурой БКУ	Дублированные, резервированные RS-422 RS-232, МКО, SpaceWire	Могут быть изменены по требованию заказчика
Формат принимаемой телекомандной информации	ESA-PSS-04-107 (ECSS-E-ST-50-04C)	
Количество декодируемых команд РК (для БКУ)	256	
Количество исполняемых импульсных РК	30	Конкретное количество (до 256) определяется заказчиком
Скорость приема командной информации от приемного устройства	1,0 кбит/с	Может быть изменена для конкретного заказа

Окончание табл. 2

Характеристика	Значение	Примечание
Формат формируемой пакетной телеметрии	ESA-PSS-04-106 (ECSS-E-ST-50-03C)	
Кодирование телеметрического кадра	Сверточное (K = 7, R = 1/2)	
Характеристика	Значение	Примечание
Скорость передачи телеметрической информации	8, 32 кбит/с	Может быть изменена для конкретного заказа
Габаритные размеры (Д, Ш, В), мм	165×190×150	
Срок активного существования, лет	15,5	
Вероятность безотказной работы за срок активного существования	0,99	Расчетный
Масса, кг	4	

Рис. 2. Внешний вид МИ КИС

Функции декодирования пакета телекоманд, формирования и кодировки полного пакета ТМИ в соответствии со стандартами *ESA* PSS-04-107 и *ESA* PSS-04-106 [3] полностью реализованы в программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) начиная с уровня представления данных в виде битового потока *TTL*-уровня. Учитывая возможности по изменению структур данных заложенные в стандартах *ESA*, использование ПЛИС дает широкие возможности по модификации прибора в части форматов телеметрии и телекоманд, конфигурации системы, форматов обмена с аппаратурой платформы без переработки плат, изменяя только программно-математическое обеспечение (ПМО) ПЛИС. Это может существенно сократить сроки доработки проекта (особенно на поздних стадиях разработки и изготовления) или модификации аппаратуры для других проектов.

Приемо-передающее устройство предназначено для работы в составе БА КИС совместно с МИ КИС; ППУ обеспечивает организацию командного радиотракта управления КА:

– прием сверхвысоких частот (СВЧ) сигналов С-диапазона с наземной станции (НС) КИС, демодуляции командно-программной информации в соответствии со стандартами *ESA/CCSDS*;

– выдачи командно-программной информации в МИ КИС по интерфейсу RS-422SBDL;

– приема от МИ КИС фазоманипулированного телеметрического сигнала;

– модуляции и передача на НС КИС телеметрического сигнала;

– приемо-передачу сигнала измерения дальности.

На рис. 3 представлен внешний вид ППУ. В табл. 3 приведены краткие технические характеристики ППУ. Структурная схема ППУ представлена на рис. 4.

Рис. 3. Внешний вид ППУ

Таблица 3. **Технические характеристики ППУ**

Параметр	Значение
Частотный диапазон запросного канала, МГц	5120÷5250
Динамический диапазон, дБВт	От минус 142 до минус 90
Частотный диапазон ответного канала, МГц	6700÷7025
Масса, кг	4,2
Габариты, мм	74×177×305
Размещение	Для негерметичного отсека

Входной высокочастотный сигнал С-диапазона от антенно-фидерного устройства поступает на малошумящий усилитель и подвергается двойному частотному преобразованию. Преобразование сигнала выполнено на двойных балансных смесителях. Для формирования частот гетеродинов на смесители использованы отечественные синтезаторы с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ). В качестве опорного сигнала ФАПЧ синтезаторов использован высокостабильный термостатированный кварцевый генератор.

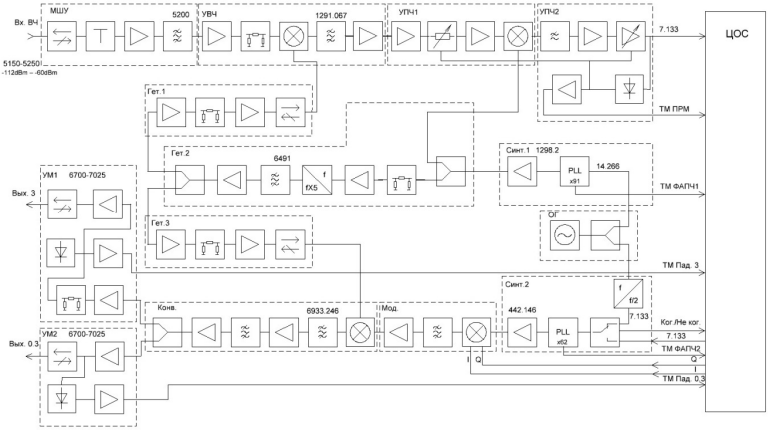


Рис. 4. Структурная схема ППУ

Отфильтрованный сигнал промежуточной частоты поступает на блок цифровой обработки сигнала (ЦОС), где происходит его демодуляция и цифровая обработка.

Формирование ответного канала выполнено по следующей схеме: ФАПЧ синтезатор формирует сигнал промежуточной частоты, который поступает на квадратурный модулятор. Далее модулированный сигнал промежуточной частоты поступает на смеситель, где происходит перенос спектра сигнала на более высокую частоту. Высокочастотный модулированный сигнал распределяется на два усилителя, которые обеспечивают два уровня мощности выходного сигнала ответного канала ППУ.

Цифровая обработка принимаемого сигнала осуществляется на ПЛИС JFM4VSX55RT-CCGA1140 ф. SFMGCL. Узел ЦОС обеспечивает:

– поиск, захват и слежение за сигналом с НС КИС;

– демодуляцию командно-программной информации;

– обмен с МИ КИС РК, КПИ, ТМ по интерфейсу RS-422SBDL;

– формирование квадратурных составляющих на IQ-модулятор;

– режим измерения дальности.

При разработке МИ КИС и ППУ в большей степени использовалась высоконадежная отечественная электронная компонентная база, в том числе последние разработки отечественных предприятий полупроводниковых приборов.

Контрольно проверочная аппаратура (КПА) предназначена для проведения отладки и полной проверки параметров МИ КИС и ППУ.

Главная цель разработанной КПА – это имитация наземного сегмента командной радиолинии; КПА включает в себя стандартные измерительные и вспомогательные приборы: это анализатор спектра, осциллограф, генератор, источники питания, аттенюатор и т. д. Ключевым прибором в КПА является шасси формата PXI NI. Шасси включает в себя контроллер, модульные приборы и векторный приемопередатчик со встроенной ПЛИС. Такой набор модулей в шасси позволяет полноценно организовывать передачу и прием сигнала по ВЧ тракту с ППУ, имитацию всех интерфейсов БКУ. Внешний вид КПА в формате PXI представлен на рис. 5.

Векторный приемопередатчик позволяет формировать и принимать сигналы с различными видами модуляции благодаря использованию в нем квадратурного модулятора и демодулятора, а также реконфигурируемой ПЛИС.

Рис. 5. Внешний вид КПА МИ КИС

В апреле 2016 г. совместно специалистами АО «ИРЗ», АО «ИСС» и ФГАОУ ВО «СФУ» были успешно проведены стыковочные испытания ППУ и МИ КИС на стенде АО «ИСС».

Выводы

Итогом проделанных работ является разработка, изготовление и успешные испытания МИ КИС и ППУ5200, созданных по европейским стандартам в условиях импортозамещения.

Для проверки МИ КИС и ППУ разработана КПА.

Разработанную бортовую аппаратуру КИС рекомендуется рассматривать как альтернативный вариант для замещения импортной аппаратуры КИС стандартов *ESA/CCSDS* в системах БА КИС.

Список литературы

1. Packet telecommand standard ESA PSS-04-107 Issue 2. – ESA, 1992. – P. 166.
2. Space data links – Telecommand protocols synchronization and channel coding ECSS-E-ST-50-04C. – ESA, 2008. – P. 155.
3. Packet Telemetry Standard ESA PSS-04-106 Issue 1. – ESA, 1988. – P. 73.
4. Space data links – Telemetry transfer frame protocol ECSS-E-ST-50-03C. – ESA, 2008. – P. 43.

Developing the Onboard Equipment of Command Measuring System of *ESA/CCSDS* Standard

This article considers results of developing onboard equipment of command measuring system ESA/CCSDS standard, taking into account the inmport substituteon.

Keywords: command measuring system; communications control unit; transponder; command link

УДК 377.044.000

В. П. Тарануха, кандидат технических наук, доцент
E-mail: albik@irz.ru
Н. Л. Тарануха, доктор экономических наук, профессор
E-mail: sfpidpo@istu.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Разработка электронных учебных курсов по профессиональной переподготовке инженерных кадров в области приборостроения

Целью программ профессиональной переподготовки с элементами дистанционного обучения в виде электронных учебных курсов является обеспечение инженерных кадровых потребностей промышленных предприятий путем формирования профессиональных компетенций без отрыва от производства.

Ключевые слова: дополнительное профессиональное образование; трудовые функции; компетенции; дистанционное обучение; электронные курсы

Основным структурным элементом при дистанционном обучении является электронный учебный курс (ЭУК). Профессионально разработанный ЭУК, учитывающий педагогические и психологические аспекты обучения с использованием инновационных технологий, является основным информационно несущим инструментом при дистанционном обучении.

В целях разработки электронных учебных курсов, отвечающих современным требованиям и обеспечивающих возможность эффективного приобретения слушателями компетенций и трудовых функций, необходим руководящий документ, унифицирующий в необходимой мере ЭУК как по структуре, так и по форме представления материалов.

Система профессиональной переподготовки инженерных кадров должна решать задачи на двух уровнях: *первый* – обеспечивать кадровые потребности инвестиционных проектов с целью повышения уровня реализуемости этих проектов; *второй* – развитие кадрового потенциала промышленных предприятий в целом.

Преимущества профессиональной переподготовки [1]:

– максимальная приближенность к практике выбранной профессии;

– продолжительность обучения 6–9 месяцев (в зависимости от направления);

© Тарануха В. П., Тарануха Н. Л., 2017

– сочетание самостоятельного обучения с обучением в лабораториях;

– сокращение времени отрыва человека от рабочего места на период обучения;

– возможность восполнить проблемы в знаниях, предоставляемых в электронном учебном курсе;

– возможность получить консультацию преподавателя посредством коммуникационных сервисов.

Разработка образовательных программ по дополнительному профессиональному образованию (ДПО) в Ижевском государственном техническом университете имени М. Т. Калашникова предполагает изучение и уточнение с работодателем трудовых функций специалистов, соответствующего перечня процессов и операций (трудовых действий), обеспечивающих выполнение этих трудовых функций и на этой основе определение необходимых компетенций специалистов (образовательных результатов программы), которые должна формировать образовательная программа.

Получение этих образовательных результатов должно обеспечить выполнение трудовых функций, требуемых реальным производством. Эти работы выполняются с обязательным участием работодателей компаний, реализующих проекты в области создания и производства продукции.

При разработке образовательной программы необходимо конвертировать трудовые функции специалиста в учебную деятельность слушателей, сформировать совокупность знаний, умений и практических навыков, обеспечивающих получение заданных образовательных результатов (компетенций) и выбрать адекватные образовательные технологии для их формирования.

В период разработки образовательных программ профессиональной переподготовки инженерных кадров решаются следующие задачи:

– изучаются и уточняются совместно с представителями работодателя трудовые функции специалистов, а также соответствующий им перечень трудовых действий (перечень процессов и операций), обеспечивающих выполнение этих трудовых функций;

– выделяются системные профессиональные компетенции как образовательные результаты программы, обеспечивающие выполнение специалистами требуемых работодателями трудовых функций;

– определяются единичные профессиональные компетенции – совокупность знаний, умений и опыта практической деятельности, позволяющих подобрать показатели для оценивания уровня сформированности компетенций слушателей после прохождения ими переподготовки;

– подбираются адекватные поставленным задачам образовательные технологии, обеспечивающие получение заданных образовательных результатов – формирование у слушателей дополнительных профессиональных компетенций;

– выбираются и обосновываются содержание и формы организации учебной деятельности;

– разрабатываются учебно-методические комплексы (УМК) (программы профессиональных модулей, контрольно-измерительные материалы для оценивания знаниевых и компетентностных результатов обучения), обеспечивающие образовательную программу;

– подбираются образовательные технологии, позволяющие работать со слушателями в режиме *e-learning*: видеолекции, самостоятельное изучение теоретического материала, лабораторные занятия, вебинары, виртуальные лабораторные работы и т. д.

На основе опыта, полученного при апробации учебного модуля в дистанционном формате, предлагаются следующие обязательные мероприятия, предваряющие начало дистанционного курса обучения.

Преподаватели должны пройти курсы повышения квалификации в области дистанционного обучения.

Слушатели также должны пройти предварительную (ознакомительную) подготовку по работе в системе дистанционного обучения.

Содержание дистанционного курса, а также виды учебных занятий (лекции, семинарские и практические занятия) должны быть скорректированы таким образом, чтобы увеличить долю самостоятельной работы слушателей (сокращение, в частности числа лекционных занятий в пользу практических).

Самостоятельная работа слушателей должна быть организована на основе деятельностного подхода: составление перечня практических заданий, обеспечивающих качественное усвоение слушателями учебного материала курса и содержащих краткие теоретические сведения и подробную методику их выполнения.

Отмена групповых подключений к вебинару: слушателям, подключающимся к вебинару дистанционно, нет никакой необходимости сидеть в одной аудитории. Намного удобнее использовать индивидуальное подключение (возможно со своего рабочего места), когда каждый слушатель может не только более качественно видеть и слышать преподавателя, но и участвовать в дискуссии как посредством текстового чата в системе *Adobe Connect*, так и благодаря подключению своего микрофона и веб-камеры.

Слушатели, подключившиеся дистанционно, должны иметь возможность получать качественную визуальную поддержку информа-

ции, сообщаемую преподавателем. Поэтому при проведении вебинаров (дистанционных лекционных занятий) обязательно наличие учебных презентаций, в полном объеме отражающих содержание учебного материала. Преподаватель, читающий лекцию дистанционно, не должен ходить по аудитории, уходя из поля зрения камеры, а также вести записи на обычной доске (слушателям невозможно воспроизвести этот материал из-за плохого качества).

Преподаватели дистанционного курса должны не только заниматься созданием учебных материалов курса, но и качественно осуществлять тьюторскую деятельность.

В связи с этим можно сформулировать ряд рекомендаций преподавателям, задействованным в реализации дистанционного обучения, в виде задач, от решения которых зависит качество электронного курса, используемого в дистанционном обучении.

Качество электронного обучения связано, прежде всего, с уровнем подготовленности преподавателей к разработке электронных курсов, пониманием ими специфики электронного обучения. Процесс создания электронных курсов весьма трудоемок, требует от авторов не только предметных знаний, опыта преподавания соответствующего материала, но и творческого подхода к созданию учебно-методических и оценочных материалов, использования эффективных педагогических технологий, владения средствами компьютерной техники, навыков работы в системе дистанционного обучения университета.

Образовательные учреждения, занимающиеся внедрением дистанционных образовательных технологий в учебный процесс, часто вкладывают существенные средства в материально-техническое обеспечение электронного обучения, забывая, что качество учебной информации и эффективность взаимодействия участников образовательного процесса напрямую зависит от компетентности преподавателя электронного курса.

В целом можно выделить две основные задачи, стоящие перед преподавателем электронного курса:

– создание электронного учебно-методического комплекса;

– качественная тьюторская деятельность.

При этом, решением обеих задач может заниматься один и тот же преподаватель. Хотя возможна ситуация, когда один преподаватель является автором электронного курса, а другой – его тьютором.

Автор электронного курса должен уметь формулировать диагностичные цели обучения, четко указывающие на результат. Зачастую преподаватели формально подходят к постановке целей электронного курса, не принимая во внимание, что от правильного выбора учебных

целей зависит выбор методов, форм и средств обучения, что в итоге обеспечивает высокие результаты процесса обучения. При постановке учебных целей преподаватель должен четко сформулировать: какой конкретно практический опыт деятельности приобретет слушатель после завершения обучения на курсе. Такая формулировка учебных целей соответствует идее деятельностного, а следственно, и компетентностного подхода в образовании. Цели обучения должны быть, прежде всего, связаны с формированием необходимых умений и навыков. Знания являются не самоцелью, а лишь средством обучения действиям.

Зачастую создатели электронных курсов не используют перспективные образовательные технологии, методики, эффективные формы обучения, делая упор на изложении больших объемов теоретического материала в текстовом или видеоформате, тем самым используя аналог лекций и других наименее эффективных форм обучения.

Необходимо помнить, что усвоение учебного материала было бы более качественным при использовании в основе электронного курса принципа проблемного обучения: сообщение учебной информации должно следовать за возникшей проблемной ситуацией, т. е. тогда, когда в этой информации возникает познавательная потребность. Преподаватель мог бы поставить перед обучающимися задачу, требующую практического решения, или вопрос, не имеющий готового однозначного ответа. Только после этого можно предложить слушателям источники полезной информации, необходимые для выполнения предложенного задания или составления аргументированного ответа на поставленный вопрос. При этом следует избегать информационной избыточности, предоставив обучающимся только самую необходимую учебную информацию, используя различные способы ее представления: ссылки на литературу с указанием конкретных страниц; небольшие авторские учебные тексты, по возможности с иллюстрациями; презентации; видеоуроки (продолжительностью не более 5 минут); ссылки на интернет-ресурсы и т. п.

Если результат изучения курса может быть оформлен в виде реального учебного продукта, целесообразно использовать технологии проектного обучения. В данном случае все практические задания можно выстроить таким образом, чтобы способствовать поэтапной реализации учебного проекта, который может послужить в качестве основы выпускной квалификационной работы.

Автору электронного курса необходимо обязательно предусмотреть в сценарии каждого учебного модуля использование дискуссий, в ходе которых обучающиеся должны ответить на ряд вопросов про-

блемного характера. Организация подобных дискуссий способствует стимулированию познавательного интереса обучающихся, формированию эмоционального контакта между всеми участниками учебного процесса, что очень важно в условиях ограниченного живого общения. Дискуссию можно организовать непосредственно в ходе показа презентации при проведении вебинара, либо в виде учебного форума в системе дистанционного обучения. Проблемный характер поставленных вопросов подразумевает, что на них не существует однозначных ответов. Каждый участник обсуждения должен высказать свою аргументированную точку зрения на поставленный вопрос. Причем совершенно не важно, будет ли его мнение совпадать с точкой зрения преподавателя. Главное, чтобы высказывание было подкреплено фактами, доказательствами, аргументами. Дискуссионные методы целесообразно использовать и в сочетании с обучением одних слушателей другими, создав, например, в материалах курса учебный форум взаимопомощи, где слушатели могут попросить у других участников курса совета в выполнении того или иного учебного задания.

Еще одной важной задачей, стоящей перед создателем электронного курса, является проектирование системы оценивания. Наиболее эффективно использование для этой цели балльно-рейтинговой системы, которая позволяет не только оценить итоговый результат, но и осуществить непрерывный мониторинг учебной деятельности: проследить, как обучающиеся пришли к этому результату. Кроме того, балльно-рейтинговую систему можно использовать в качестве одного из факторов, способствующих поддержанию мотивации обучающихся на достаточно высоком уровне на протяжении всего учебного процесса.

При использовании балльно-рейтинговой системы очень важно правильно определить стоимость каждого задания в баллах, а также выявить критерии, позволяющие адекватно, однозначно и объективно оценить различные элементы электронного курса.

Оценивание должно быть формирующим, направляющим обучающегося в процессе обучения в нужном направлении. Это не просто выставление оценок, баллов и т. п., но обозначение недоработок, путей последующего развития (причем зачастую это может быть самообозначение, либо обозначение с помощью коллег по группе). Таким образом, необходимо вовлекать обучающихся в процесс оценивания. Оценивая других, обучающийся, по сути, включается в процесс их обучения. А, как известно, именно обучая других, человек лучше всего усваивает и структурирует информацию. Для объективной оценки своей работы и работы коллег обучающимся необходимо четко задавать критерии оценивания и следить за их соблюдением.

Последним этапом создания электронного курса обязательно должна быть его апробация. По итогам апробации автор курса может сделать вывод о достижимости поставленных учебных целей с использованием отобранного учебного материала, разработанных заданий, выбранных методов, форм и средств обучения. В результате могут быть скорректированы содержание и сценарий всего курса или отдельных его модулей, пересмотрены критерии оценивания и распределение баллов, назначенных за выполнение заданий. Второй, не менее важной задачей, которую должен решать преподаватель электронного курса, – это тьюторская деятельность. Тьютор – это преподаватель-консультант, который организует эффективное изучение курса. В деятельности тьютора электронного курса в общем случае можно выделить три составляющие:

– проведение очных занятий (вебинаров);

– проверка самостоятельной работы (практические задания и учебные форумы);

– консультирование (индивидуальное и групповое).

Организация очных занятий зависит от типа группы: только очники, смешанная группа или только вебинаристы. Сложнее всего организовать очные занятия смешанной группы, когда часть слушателей присутствует в аудитории, а часть подключается к занятию в режиме вебинара. В такой ситуации преподаватель зачастую переключает все свое внимание на очную часть группы, забывая о вебинаристах и не предоставляя им возможности участия в дискуссиях. При работе с вебинаристами преподаватель должен обладать способностью наладить диалог обучающихся не только с ним, но и друг с другом, использовать элементы обучения в сотрудничестве, что способствует наиболее качественному усвоению учебного материала.

Можно сформулировать общие требования к тьюторской деятельности.

Изучение дистанционного курса обеспечивает преподаватель-консультант. Преподаватель обязан обеспечить своевременное начало обучения, координировать учебную деятельность, отслеживать успеваемость, оперативно консультировать участников курса, объективно и своевременно оценивать результаты учебной деятельности, заниматься формированием личности обучающегося.

Преподаватель имеет право в процессе реализации электронного курса добавлять дополнительные учебные материалы и ссылки на интернет-ресурсы, способствующие усвоению учебного материала при условии соблюдения законодательства в области авторского права.

Компетентность преподавателя в области создания и реализации электронного курса является ключевым фактором в достижении высокого качества электронного образования.

Решение данных задач с использованием дистанционного обучения позволяет изменить квалификацию специалиста без отрыва от основного производства, доведя ее до требуемого работодателем уровня. Преподавательским составом кафедры «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова разработаны и реализованы дистанционные модули для программ профессиональной переподготовки в сфере приборостроения: «Разработка и производство танталовых чип-конденсаторов и суперконденсаторов», «Проектирование и контроль качества накопителей энергии на основе наноструктурированных материалов» для предприятия ОАО «Элеконд» [2].

Формирование новых образовательных программ способствует развитию кадрового потенциала предприятий и региональной экономики в целом. Быстрый рост экономики, развитие новых сфер производства требуют качественной подготовки технически грамотных инженерных кадров.

Список литературы

1. *Тарануха*, *Н. Л.* Система профессиональной переподготовки кадров для наноиндустрии в Ижевском государственном техническом университете имени М. Т. Калашникова // Вестник ИжГТУ. – 2013. – № 3(59).

2. *Тарануха*, *Н. Л.* Инвестиционные проекты подготовки высококвалифицированных инженерных кадров в области наноиндустрии / Н. Л. Тарануха, В. П. Тарануха // Инновации в образовании : сб. материалов науч.-метод. конф. – Ижевск : ИННОВА, 2016. – С. 89–93.

Creating of New Educational Courses Aimed at Professional Re-training of Instrumentation Engineers

The objective of professional retraining programs with partial distant learning in the form of electronic courses is to satisfy the needs of industrial enterprises in engineering staffing by means of on-job forming the new professional expertise.

Keywords: continuing professional education; labour function; expertise; distant learning; electronic courses

УДК 62.519

А. В. Тураев, студент
E-mail: alekseyturaev@yandex.ru
Техникум радиоэлектроники и информационных технологий, г. Ижевск

Устройство удаленного управления «умным домом»

Рассматривается концепция IoT (Internet of Things) и ее практическая реализация на примере устройства удаленного управления «умным домом».

Ключевые слова: esp8266; Wi-Fi; IoT; NodeMcu; LoLin

Введение

В настоящее время часто встречается выражение «интернет вещей», смысл которого многие понимают, как «вещи, которые имеют выход в интернет». Прямой перевод англоязычной формулировки *Internet of Things* (IoT) имеет значение «сеть вещей». Сеть подразумевает обмен информацией между ее участниками, т. е. если вещи обмениваются между собой информацией, то они могут выполнять некоторые действия за нас. Интернет вещей – это не просто набор различных устройств и датчиков, объединенных в сеть, а это более тесная интеграция реального и виртуального миров, в котором общение производится между людьми и устройствами [1]. В этой статье автор рассмотрит IoT на примере устройства удаленного управления объектами «умного дома».

Устройство удаленного управления объектами «умного дома»

В настоящее время чаще используются модули управления объектами «умного дома» на основе датчиков и сенсоров, расположенных непосредственно в помещении «умного дома». Но это не всегда удобно для использования, потому что некоторые действия могут занимать определенное время до момента их исполнения. Чтобы избежать ожидания, можно установить работающий на основе технологий Ethernet [2] и Wi-Fi [3] модуль управления, взаимодействие с которым позволит управлять объектами «умного дома» на расстоянии (например, включать и выключать их). Таким образом, цель работы автора заключается в разработке устройства, позволяющего удаленно управлять объектами «умного дома».

© Тураев А. В., 2017

При изготовлении данного устройства автор поставил перед собой следующие задачи:

1. Разработать модуль, который должен при получении команды от пользователя переключать реле из положения «Выключено» в положение «Включено» и наоборот.

2. Осуществить передачу всех команд управления по технологиям Wi-Fi и Ethernet.

Перед началом разработки данного устройства передо автором встал выбор воспользоваться одной технологией Ethernet или комбинировать технологии Ethernet и Wi-Fi. Выбор был сделан в пользу комбинации технологий Ethernet и Wi-Fi, потому что благодаря использованию технологии Wi-Fi теряется необходимость в расположении модуля управления непосредственно около точки доступа к сети «Интернет», а также в протягивании витой пары до модуля управления, поскольку в этом случае его можно расположить в любом более удобном месте.

Управление объектами «умного дома» осуществляется с помощью реле посредством его переключения при изменении уровня напряжения на управляющих контактах. Возможно одновременное подключение нескольких реле для управления сразу несколькими объектами «умного дома» через один веб-интерфейс. Сеть, в которой будет работать разрабатываемое устройство, можно представить на рис. 1.

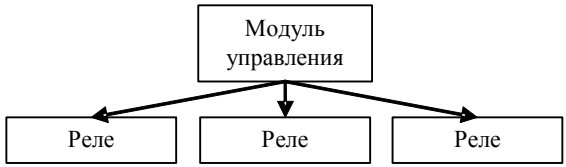


Рис. 1. Схема сети разрабатываемого устройства

Модуль управления – реализует веб-интерфейс для взаимодействия с пользователем, выполняет отправку и прием сообщений от устройства по технологии Wi-Fi.

Реле управляет объектами «умного дома», получает команды от модуля управления.

Пример адресации модуля управления в сети:

IP адрес: 192.168.0.x, где x – число от 0 до 255.

Маска подсети: 255.255.255.0.

Основной шлюз: 192.168.0.1.

Исходя из всего вышеизложенного, для работы сети необходимы следующие службы: HTTP Server [4], DHCP Server [5], Wi-Fi AP [6].

В качестве модуля управления используется плата NodeMcu v3 на основе Wi-Fi модуля ESP8266, произведенная компанией LoLin (рис. 2).

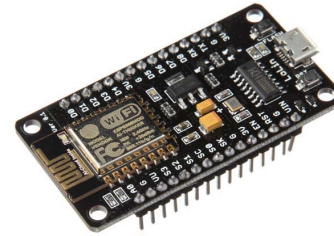


Рис. 2. ESP8266 NodeMCU v3

Отличительные особенности данной платы: наличие встроенного USB to TTL Converter (CH340G) и преобразователя напряжения в 3,3 В [7]. Этим обеспечивается удобство в использовании данной платы.

Команды управления передаются посредством веб-интерфейса (рис. 3).

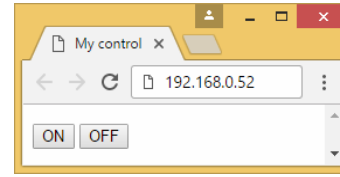


Рис. 3. Веб-интерфейс модуля управления

При активации кнопки ON веб-интерфейса реле замыкает цепь питания, и подключенное к реле устройство включается. При активации кнопки OFF веб-интерфейса реле размыкает цепь питания, и подключенное к реле устройство выключается.

Для начала работы с ESP8266 NodeMcu v3 неоходимо на компьютер установить драйвер USB to TTL Converter'a. При этом плата должна быть отключена от компьютера.

После этого можно приступить к обновлению прошивки платы, для чего потребуется специально разработанная для данной платы программа, например, ESP8266Flasher [8].

Перед обновлением прошивки нужно узнать номер COM-порта в диспетчере устройств Windows (рис. 4). После чего в ESP8266Flasher необходимо указать номер COM-порта, который определили в диспетчере устройств (рис. 5).

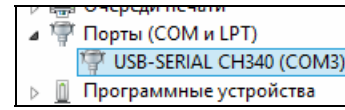


Рис. 4. Отображение CH340 в диспетчере устройств Windows

Для успешного обновления прошивки на ESP8266 NodeMcu v3 в ESP8266Flasher в разделе Advanced необходимо установить Baudrate 9600 [9] (рис. 6).

После чего необходимо вернуться в раздел Operation и нажать на кнопку Flash для начала обновления прошивки, которое обычно занимает не более 10 минут (рис. 7).

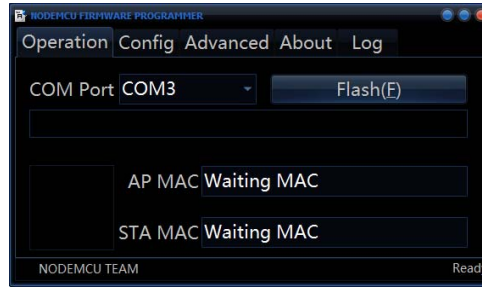


Рис. 5. Выбор COM-порта в ESP8266Flasher

Рис. 6. Настройка обновления прошивки в ESP8266Flasher

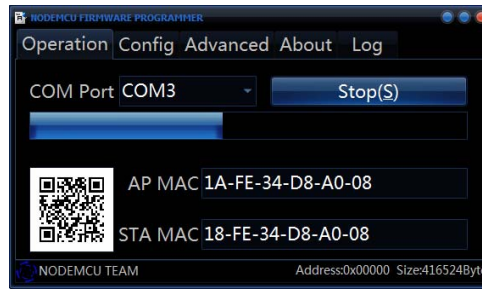


Рис. 7. Процесс прошивки ESP8266 NodeMcu v3

При успешном обновлении прошивки окно ESP8266Flasher принимает вид, изображенный на рис. 8.

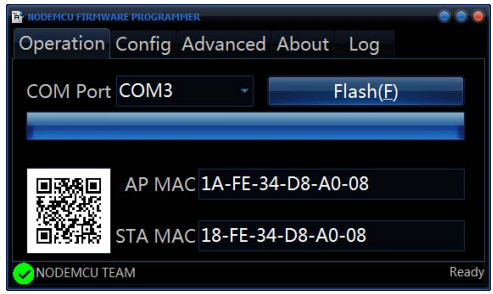


Рис. 8. Успешное завершение обновления прошивки

После завершения обновления прошивки плату необходимо переподключить к компьютеру и можно приступить к разработке программного обеспечения для данного устройства. Для удобства при написании программы можно воспользоваться средой программирования для NodeMcu, например, ESPlorer [10], которая является бесплатной средой программирования (рис. 9).

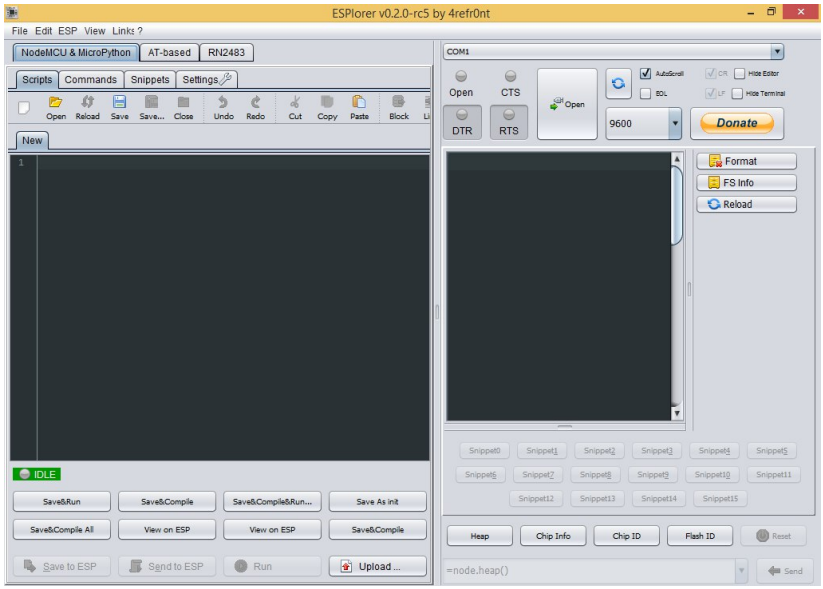


Рис. 9. Главное окно ESPlorer

Для подключения ESP8266 NodeMcu v3 необходимо в правой части окна выбрать параметры загрузки Baudrate равный 9600, нажать на кнопку Open, нажать 2 раза на кнопку DTR, после чего в правой части окна ESPlorer будет указана информация об определении или неопределении ESP8266 NodeMcu v3. Если ESP8266 NodeMcu v3 не определяется, то это обычно связано с неудачным обновлением прошивки или неисправностью кабеля USB или USB-порта компьютера.

Для переноса программы во внутреннюю память ESP8266 NodeMcu v3 необходимо открыть ее в левой части окна ESPlorer и нажать кнопку Save to ESP, после чего начнется процесс копирования программной составляющей во внутреенюю память ESP8266 NodeMcu v3 и ее запуск.

Для автоматического запуска программы на ESP8266 NodeMcu v3 при подключении к сети питания необходимо файл программы переименовать в init.lua.

Проверить правильность работы можно по внутреннему IP адресу, который можно определить путем отправки команды wifi.sta.getip() на ESP8266 NodeMcu v3 через поле отправки команд в правом нижнем углу ESPlorer. При переходе по указаному IP адресу в локальной сети должен открыться настроенный ранее веб-интерфейс.

Чтобы данный веб-интерфейс был доступен в сети «Интернет», необходима дополнительная настройка переадресации на роутере.

Выводы

В ходе работы были реализованы все поставленные цели и задачи по разработке и изготовлению устройства удаленного управления объектами «умного дома» по технологиям Ethernet и Wi-Fi. Данная разработка будет иметь широкое применение в сфере удаленного управления объектами «умного дома», т. к. к данному модулю управления можно подключить необходимое пользователю количество реле, датчиков и других устройств управления и контроля объектами «умного дома». Кроме этого, в качестве дальнейшей проектной разработки предполагается внести элементы двухпозиционной сигнализации (Вкл/Выкл) по прохождению команд управления.

Список литературы

1. Беспроводная точка доступа // wikipedia.org. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Беспроводная_точка_доступа (дата обращения: 15.11.2016).

2. Веб-сервер // wikipedia.org. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Веб-сервер (дата обращения: 15.11.2016).

3. Нужна помощь – NodeMCU V3 (LoLin) – невозможно подключиться после прошивки | Сообщество esp8266 // esp8266.ru. – URL: https://esp8266.ru/forum/threads/nodemcu-v3-lolin-nevozmozhno-podkljuchitsja-posle-proshivki.1199/#post-17109 (дата обращения: 15.11.2016).

4. Радиосеть управления освещением с использованием технологии Wifi (esp8266). Ч. 1 – Omoled.ru // Omoled.ru. – URL: http://omoled.ru/publications/view/899/ (дата обращения: 14.11.2016).

5. Радиосеть управления освещением с использованием технологии Wifi (esp8266). Ч. 2 – Omoled.ru // Omoled.ru. – URL: http://omoled.ru/publications/view/901/ (дата обращения: 14.11.2016).

6. IEEE-SA -IEEE Get 802 Program - 802.3: Ethernet // ieee.org. – URL: http://standards.ieee.org/about/get/802/802.3.html/ (дата обращения: 14.11.2016).

7. ESPlorer – esp8266 – esp8266.ru // Omoled.ru. – URL: https://esp8266.ru/esplorer/ (дата обращения: 15.11.2016).

8. GitHub – nodemcu/nodemcu-flasher: A firmware Flash tool for nodemcu // github.com. – URL: https://github.com/nodemcu/nodemcu-flasher/ (дата обращения: 15.11.2016).

9. RFC 2131 – Dynamic Host Configuration Protocol // ietf.org. – URL: https://tools.ietf.org/html/rfc2131/ (дата обращения: 15.11.2016).

10. Wi-Fi Alliance // wi-fi.org. – URL: http://www.wi-fi.org/ (дата обращения: 14.11.2016).

Remote Control Device for ”Smart Home“

The article examines concept of IoT (Internet of Things) and its practical implementation on the example of a remote control device for "Smart Home".

Keywords: esp8266; Wi-Fi; IoT; NodeMcu; LoLin

УДК 004.422.000

Р. Д. Хабибуллин, студент
О. Я. Шамсиахметов, ведущий инженер-электроник кафедры «КРА»
E-mail: olegsha64@mail.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Поиск визуальных фрактальных размерностей окружающего мира

Существует функциональная зависимость восприятия информации человеком через органы чувств. Была попытка создания адекватной зрительной модели окружающего мира с использованием возможностей самоповторяющихся фрактальных структур. Результатом научных изысканий явилось подтверждение тезиса о равноправном влиянии на информационные каналы формы и содержания анализируемого визуального объекта.

Ключевые слова: фракталы; информационное воздействие; самоповторяющиеся структуры; визуализатор; программный алгоритм

Влияние окружающего информационного поля на человека огромно. Агрессивная информационная среда заставляет человеческий организм адекватно реагировать на перманентные изменения внешней обстановки. Немаловажную роль в информационном канале человека играют органы слуха и зрения [1–4].

Однозначно существует некая связь между слухом и зрением. Эта связь линейная, т. к. нервные окончания от чувствительных органов уходят непосредственно в головной мозг. Существуют многочисленные факты, экспериментально проверенные, подтверждающие связь между органами слуха и зрения. При утере или ослаблении одного из органов чувств остальные части тела усиливают свою деятельность, чтобы восполнить частично потерю, и это косвенно подтвержает существующую информационную связь.

Авторы взяли за основу тот факт, что восприятие одного и того же аудиовизуального файла в различное время суток неоднозначно.

Проведенные блиц-тесты на случайно отобранных группах людей подтвердили оригинальную авторскую версию. В ней выражается уверенность, что на человека воздействует, в первую очередь, «чарующее» уникальное сочетание видео-аудио информации, настроенное в резонанс человеческому организму. По мере изменения кислотно-солевого баланса в течение суток происходит флуктуация общего ре-

© Хабибуллин Р. Д., Шамсиахметов О. Я., 2017

зонанса человеческого тела по частоте. Поскольку информационный файл является константой во времени, то он не может подстроиться на эти временные изменения.

Из этого можно сделать два важных вывода:

1. Смысловая нагрузка информационного поля является вторичной.

Это ярко наблюдается на примере иностранных музыкальных композиций, смысл которых человек не улавливает, а сама мелодическая последовательность оказывает сильнейшее воздействие на организм.

2. Информационным воздействием на человека можно управлять, подстраивая его на нужный лад. Простой пример данного утверждения: красный цвет человека возбуждает (красные фонари), зеленый цвет снимает внутреннее напряжение (зеленые стены в лечебных учреждениях).

Представляют практический интерес четыре творческие задачи:

1. Как подобрать визуальный ряд информации, чтобы он максимально оказывал влияние на личность?

2. Как подобрать визуальный ряд, чтобы он никогда не надоедал (т. е. не повторялся)?

3. Можно ли изобразить звуковые последовательности абстрактным рисунком на основе графических примитивов?

4. Можно ли усилить психоэмоциональное воздействие абстрактным зрительным образом?

Для решения поставленных задач была создана модель визуализации. Модель представляла собой зрительный образ, состоящий из графических примитивов (линий, треугольников, квадратиков, ромбов).

Чтобы избежать повторения зрительной картинки, построенной программой, были внедрены элементы случайности на основе фрактального (дробного) генератора. Поскольку окружающий мир имеет дробную размерность и состоит из многократно самоповторяющихся примитивов (фракталов), то в основу метода визуализации положены фундаментальные принципы построения окружающего мира (дробность и самоповторяемость).

Любая самая сложная картинка по мере ее детализации распадается на фрактальные цепочки. Если рассмотреть отдельные размерности и составить из них кластеры (орнамент), то это должно воздействовать на зрителя так, как созерцание фрагмента окружающего мира. При этом необходимо учесть коэффициент ослабления восприятия за счет уменьшения детализации общей картины визуального пространства.

В итоге был создан авторский визуализатор на основе фрактального генератора. Для проведения полноценных экспертных оценок необходимо было создать доступную демонстрационную модель, раскрываю-

щую все возможности визуализатора. Была выбрана наиболее доступная современная информационная оболочка-браузер. Однако программные возможности существующих браузеров ограничены единственным популярным языком *JavaScript*. Поэтому программный алгоритм был реализован на данном языке, т. к. он поддерживался большинством популярных браузеров (*Google Chrome*, *Yandex*, *Mozila Firefox*).

Для генерации фракталов существует множество готовых программ и алгоритмов. С их помощью можно создать бесконечное количество удивительных по красоте фрактальных изображений. Но при построении визуальных изображений большинство параметров (базовая линия, количество фрактальных линий, цвет, толщина) задаются субъективно человеком, сидящим за монитором. Была реализована идея создания генератора, который сам бы задавал часть параметров. Для этого нужен набор случайных чисел. Источником случайных чисел было выбрано музыкальное сопровождение, как оригинальное неповторяемое сочетание нотных последовательностей.

Алгоритм работы визуализатора

1. Обрабатывается аудиозапись.

Простейший способ извлечения переменных из аудиозаписи – использование многополосного фильтра-эквалайзера. При этом разбивается весь диапазон частот на 512 частей. На выходе выдается массив на 512 переменных. Этот массив представляет собой случайные числа, которые нужны для создания уникальности рисунка.

Фрагмент программного кода на языке JavaScript:

```
var context = new AudioContext();
var audioBuffer;
var sourceNode;
var analyser;
var javascriptNode
function start(files) {
loop();
// Создать audiocontext
if (!window.AudioContext) {
if (!window.webkitAudioContext) {
alert('no audiocontext found'); }
window.AudioContext = window.webkitAudioContext; }
// Загрузка звука
setupAudioNodes();
loadSound(files[0]); }
function setupAudioNodes() {
//Настройка узла Javascript
javascriptNode = context.createScriptProcessor(2048, 1, 1);
// Подключение к месту назначения,
// иначе оно не называется
javascriptNode.connect(context.destination);
```

```
javascriptNode.onaudioprocess = function () {
// Получение среднего значения для первого канала
var array = new Uint8Array(analyser.frequencyBinCount);
analyser.getByteFrequencyData(array);
drawSpectrum(array); }
// Настройка анализатора
analyser = context.createAnalyser();
analyser.smoothingTimeConstant = 0.5;
analyser.fftSize = 512;
// Создание узла исходного буфера
sourceNode = context.createBufferSource();
sourceNode.connect(analyser);
analyser.connect(javascriptNode);
sourceNode.connect(context.destination); }
```

2. Обработка данных массива программным генератором.

3. Изменение количества итераций в зависимости от значений конкретной частоты.

4. Изменение текущего цвета от заданного количества итераций.

5. Случайная дивиация координат каждого фрагмента изображения в ограниченном интервале расстояний с заданной частотой обновления конечного рисунка.

6. Изменение цвета при дальнейшем увеличении частоты.

Один из вариантов работы программы представлен на рис. 1.

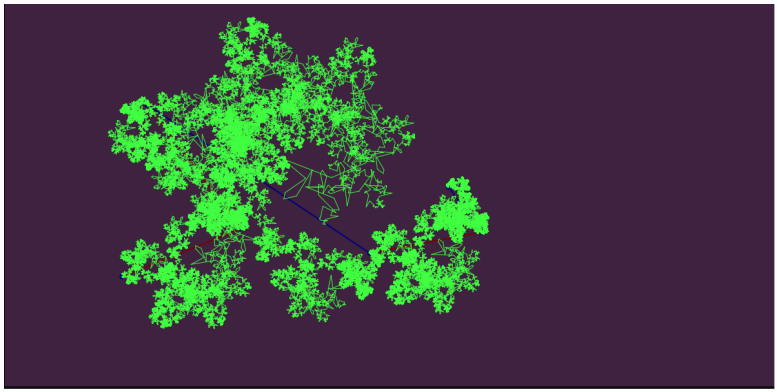


Рис. 1. Скриншот работы визуализатора

Была проведена оценка работы программы визуализатора путем опроса общественного мнения. В ходе тестирования предлагалась демомодель в сопровождении двух музыкальных фрагментов классического и эстрадного содержания. Опрос был проведен случайной выборкой пользователей соцсетей (до ста человек).

Участникам было предложено ответить лаконично на следующие вопросы:

1. Понравилась работа демомодели?
2. Нет ли монотонности визуализации?
3. Оригинальна ли предложенная картинка?
4. Не вызывает ли агрессивных эмоций данный видеоряд?

В результате большинство опрошенных оценили положительно предложенную программу. В качестве предложений поступила интересная идея промоделировать также и фоновую картинку, т. к. в данном варианте присутствует статичный однородный фон.

Выводы

Следствием работы визуализатора явилось полное исчерпание базовых ресурсов компьютера и временное зависание выполнения основной программы. Анализ проблемы выявил причину: многократная прорисовка конечного изображения. Поэтому была экспериментально подобрана оптимальная частота прорисовки путем частичного увеличения временных интервалов задержки сигнала без ухудшения качества зрительного восприятия.

Список литературы

1. *Мандельброт*, *Б.* Фрактальная геометрия природы / пер. с англ. – М. : Институт компьютерных исследований, 2010. – 365 с.

2. *Потапов*, *А. А.* Фрактальные элементы и радиосистемы: Физические аспекты : моног. / А. А. Потапов, А. Х. Гильмутдинов, П. А. Ушаков ; под ред. А. А. Потапова. – М. : Радиотехника, 2009. – 200 с.

3. *Евин*, *И. А.* Искусство и фракталы // Вопросы культурологи. – 2009. – № 6. – С. 34–37.

4. Флэнаган, *Д.* JavaScript. Подробное руководство / пер. с англ. – 6-е изд. – М. : Символ-Плюс, 2012. – 1080 с.

5. *Моррисон*, *М.* Изучаем JavaScript / пер. с англ. – М. : Питер. 2012 – 380 с.

Search for Visual Fractal Dimensions of the Surrounding World

There is a functional dependence of the information perception through the senses. An attempt was made to create an adequate visual model of the world based on features of self-repeating fractal structures. The result of research is the confirmation of the thesis of an equal impact of form and content of the visual object under analyze on the information channels.

Keywords: fractals; information influence; self-repeating structure visualizer software algorithm

УДК 629.76.038

А. Г. Черняев, студент
E-mail: dungeonlords789@yandex.ru
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королева

Электроника студенческой ракеты

Работа посвящена теме разработки бортовой электроники для студенческой ракеты самарского университета. В результате прочтения статьи у читателя сложится представление о целях, задачах и проблемах, стоящих перед разработчиком. Приобретенная информация может быть использована для конструирования атмосферных зондов, систем навигации и мониторинга.

Ключевые слова: студенческая ракета; кансат; *C'Space*

Введение

Во Франции традиционно организуется Международный формум *C'Space* с целью обмена опытом в студенческом ракетостроении. В рамках форума по запуску ракет и кансатов *C'Space* студенты самарского университета уже несколько лет подрят представляют свои ракеты (рис. 1). Целью работы является приобретение опыта в создании действующих моделей ракет. Целью запуска является обеспечение вывода на заданную высоту атмосферных зондов типа *CanSat*, измерение качественных показателей полета, обеспечение мягкой посадки, передача местонахождения ракеты. Подобные форумы проводятся во многих странах, в том числе в США, РФ.

В рамках проекта перед студентами стоит ряд вопросов:

1. Выбор аэродинамической схемы, обеспечивающий стабильный полет, размещение атмосферных зондов внутри ракеты;

2. Выбор материалов корпуса и основания достаточно легких и достаточно крепких, чтобы выдержать импульс 2486 Н·с твердотельного ракетного двигателя Pro-75 [1];

3. Разработка бортовой электроники, обеспечивающей безотказную работу датчиков, исполнительных механизмов и систем телеметрии в условиях ударных нагрузок;

4. Разработка приемной станции.

© Черняев А. Г., 2017

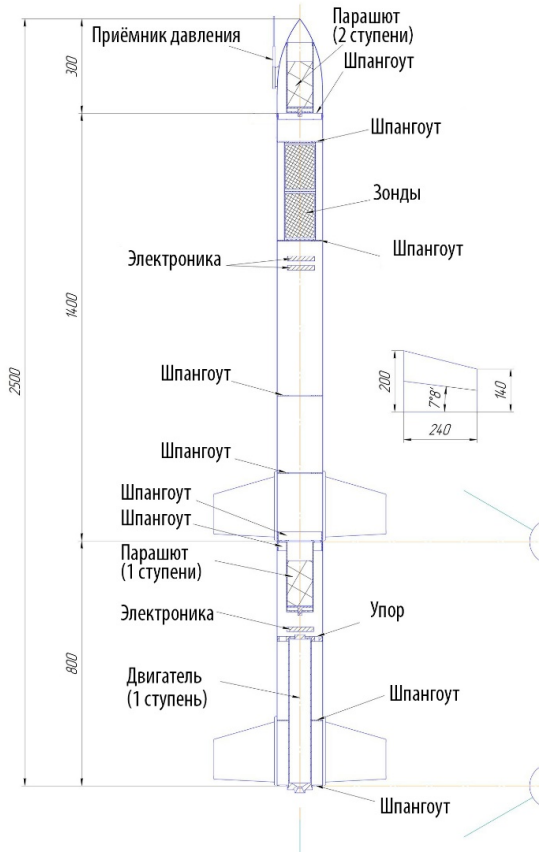


Рис. 1. Компоновка ракеты

В рамках данной работы рассматривается п. 3. Задача первой ступени – расстыковка в нужное время, обеспечение мягкой посадки первой ступени. Задача второй ступени – вывод на заданную высоту атмосферных зондов, измерение качественных показателей полета, обеспечение мягкой посадки второй ступени, передача местонахождения.

Этапы полета

Предполетная готовность: ракета находится на стартовом столе в течении не более 40 минут, может быть запущена в любое время путем подачи стартового импульса на двигатель, причем в бортовую

электронику этот импульс не приходит. Бортовая электроника находится в режиме пониженного энергопотребления: работают каналы опроса чеки и акселерометра.

Полет: из-за ускорения вырывается чека, прикрепленная одним концом к стартовому столу, другим – к ракете. Отрыв чеки или значительное ускорение детектируется электроникой, она выходит из режима пониженного энергопотребления, запускаются: таймер, канал измерения дифференциального давления, прием данных о местоположении, прием данных об ориентации ракеты, передача этих данных по радиоканалу, сохранение всех данных на бортовом накопителе (черный ящик). При достижении расчетного времени подается команда на разделение ступеней, выброс парашюта первой ступени, запуск второго двигателя, поочередное открытие замков кансатов, выпуск парашюта второй ступени.

На земле: на основе анализа ускорения ракета определяет свое положение как «на земле», выключается вся переферия с сохранением только передачи местоположения по радиоканалу, что позволяет найти ракету либо по точным координатам, либо пеленговать.

Используемые датчики и приемопередатчик

Приемопередатчик CC1125

Для передачи данных по радиоканалу используется приемопередатчик CC1125, имеющий широкие возможности настройки под конкретную задачу. Нас интересует передача на максимальную дальность, не интересует высокая скорость обмена данными, поэтому были заданы следующие возможные настройки:

частота: 433 МГц;

тип модуляции: частотная (2-FSK);

мощность передачи: +15 дБм;

скорость: 1,2 кбит/с.

Выбранный тип модуляции в совокупности с максимально возможной мощностью позволяет добиться максимальной дальности. Что касается скорости передачи, рассмотрим структуру пакета, приведенную в табл. 1.

Легко увидеть, что запас ширины канала составил 679 байт.

В качестве антенны для передающей части была выбрана штыревая антенна, обеспечивающая небольшие размеры, малую массу, простоту изготовления и обслуживания, а также имеющую оптимальную диаграмму направленности для подвижного объекта – ракеты. Длина волны 433 МГц – 0,7 м, тогда длина четвертьволновой (штыревой) антенны составит 17,25 см. Коэфициент усиления – порядка 5 дБи.

Таблица 1. **Структура пакета для передачи**

Информация	Период, с	Размер, байт	Канал, байт/с
Положение (по спутнику)	1	54	54
Ориентация	0,05	16	320
Данные приемника воздушного давления	0,05	4	80
CRC	0,05	1	20
Время относительно старта	0,05	2	40
Ориентация	0,5	18	36
Итого			**550**

Расчет дальности связи невозможен без учета данных приемника. В нашей приемной станции предполагается использование также CC1125, с настройкой чувствительности на –123 дБм; спиральной антенны с поперечным излучением, коэффициент усиления 1,9 дБи [2]. Расчет с использованием уравнения Фрииса [4] показал нереалистичную цифру в 24 545 м, поэтому, в соответствии с рекоммендациями производителя [3], был скорректирован с учетом интерференции, высотности, и в итоге расчетная дальность радиосвязи составила 2231 м, что достаточно для полета на высоту 2000 м и ниже.

Ориентация в пространстве. MPU-9250

MPU-9250 – современный девятиосевой сенсор движения, его преимущество в том, что он сочетает гироскоп, акселерометр, магнитометр в одном корпусе, также внутри размещена КМОП-электроника. Модуль характеризуется низким потреблением, невысокой стоимостью. Подключение к микроконтроллеру возможно через шину I²C. Разрешение гироскопа и акселерометра – по 16 бит на канал, магнетометра – 14 бит, чего более чем достаточно для вычисления ориентации ракеты в каждый момент времени, что позволяет качетсвенно оценить выбраные аэродинамические решения в ракете.

Местоположение. ML8088sE

ГЛОНАСС, GPS модуль ML8088sE обеспечивает уверенный прием за счет использования всех действующих систем спутниковой навигации. Низкое энергопотребление позволяет применять его для поиска ракеты в течение длительного времени. Подключается к микроконтроллеру по UART.

Скорость полета. MPX5100DP

Скорость полета может быть вычислена различными путями, однако самым эффективным мы считаем вычисление скорости по разности давлений, создаваемой набегающим потоком и давлением статиче-

ским. Разность эта измеряется с помощью датчика дифференциального давления MPX5100DP. Датчик аналоговый, мы используем АЦП микроконтроллера, чтобы получить цифровой эквивалент. Единственный датчик, который не позволяет питать себя от 3,3 В, поэтому в цепи питания MPX5100DP используется DC-DC-преобразователь из 3,3 В в 5 В.

Перевод разницы давлений в скорость осуществляется согласно уравнению Эйлера [5].

$$c = \frac{2p}{\rho}2, \qquad (1)$$

где p – давление, измеряемое датчиком; ρ – плотность воздуха (считается по уравнению Клапейрона – Менделеева).

Вторая ступень

Ракета *TSR* имеет две ступени, которые разделяются во фремя полета. Первая (нижняя) ступень, сервомашинка, вал, которой соединен с резьбовой шпилькой, вкрученной в резьбу второй ступени видны на рис. 2. По команде микроконтроллера первой ступени запускаются три мотор-редуктора, выкручивая соответствующие шпильки и освобождая вторую ступень. После разделения двигатель второй ступени может быть запущен.

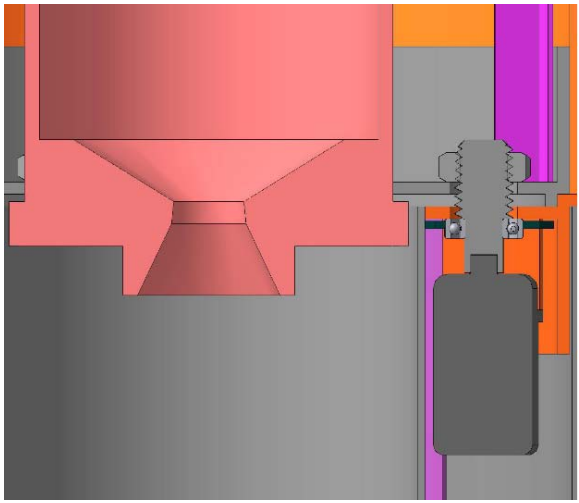


Рис. 2. Механизм расстыковки, фрагмент

Электровоспламенитель второго двигателя питается от отдельного аккумулятора и запускается по команде микроконтроллера второй ступени. Достаточные значения няпряжения и тока запалу можно обеспечить одним *Li-Ion* аккумулятором емкостью более 2 А·ч.

Запуск второго двигателя сопряжен с рядом профилактических мер, исключающих случайное срабатывание пиромеханизма. Ложные срабатывания могут возникнуть по следующим причинам:

1. Ударов статического электричества.

2. Неточности в программе, когда бортовая электроника интерпритирует некоторые собыия как сигнал к запуску.

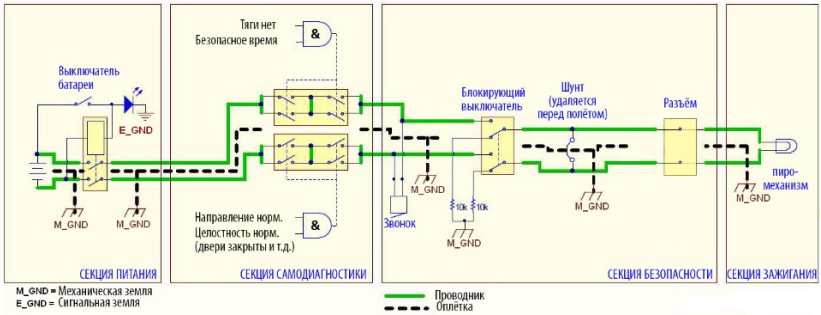


Рис. 3. Система запуска второго двигателя

Примером такого события может являться случайный отрыв чеки во время обслуживания ракеты на стенде. Для предотвращения подобного микроконтроллер перед коммутацией электровоспламенителя анализирует время, ускорение, ориентацию, закрытость люков ракеты. Если все условия выполнены, двигатель можно запускать. Для защиты от статического электричества применяется заземление на корпус. Как дополнительная мера защиты используется механический выключатель, коммутируемый обслуживающим персоналом непосредственно перед стартом и шунт, удаляемый перед стартом.

Исполнительные механизмы

Главной движущей силой механизмов системы спасения, выброса зондов, расстыковки ступеней являются сервомашинки. Они обеспечивают значительный крутящий момент и способны удерживать заданное положение. Это позволяет обеспечить работу электромеханических замков в условиях ударных нагрузок. Опытным путем было установлено, что момента 9,6 кг/см достаточно для открывания любого

из замков. Для унификации во все системы были закуплены одинаковые аналоговые сервомашинки.

Особенность системы разделения ступеней: нет нужды в удержании положения вала, поэтому для упрощения управления сервомашинки были переделаны в мотор-редукторы. Схема управления, поддерживающая вращение в обоих направлениях, приведена на рис. 4. Сигнал “Forward” (с англ. – «вперёд») подается для закручивания, “Backward” (с англ. – обратно) подается для откручивания – таким образом производится стыковка ступеней перед стартом и расстыковка для хранения.

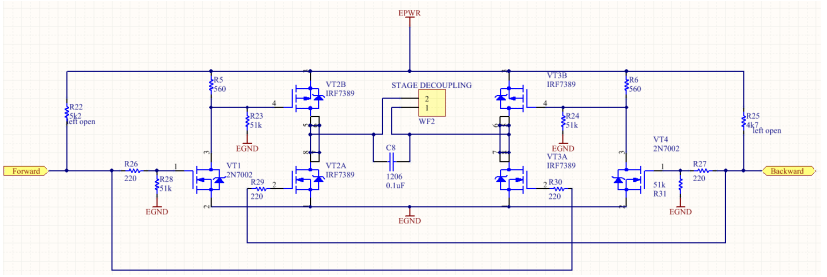


Рис. 4. Мостовая схема управления

Микроконтроллер

Микроконтроллер должен успевать опрашивать все датчики, вовремя выдавать управляющие воздействия и выдавать информацию в канал приемопередатчика. С этой задачей способны справиться почти все современные модели. Мы использовали *ATmega128* в обеих ступенях из-за наличия большого количества информации по его применению, опыта, средств разработки и отладки, количества линий ввода-вывода, подходящей переферии, небольшого энергопотребления.

Программа выполнена на Си, использует прерывания для опроса датчиков, что не позволяет ей зависнуть в случае, когда хотя бы один из них выйдет из строя.

Питание

Для питания, согласно требованиям форума, используется разделение на цифровую и силовую части. Под цифровой частью будем понимать цепи компонентов, приведенных в табл. 2. Питание цифровой части осуществляется от аккумулятора цифровой части согласно схеме с рис. 5.

Таблица 2. **Потребление цифровой части**

Компонент	Макс. ток, мА
ATmega128 (микроконтролер)	40
AT45DB161 (чёрный ящик)	7
MPU-9250 (ориентация)	3,5
ML8088sE (местоположение)	60
MPX5100DP (дифференциальный датчик давления для ПВД)	7
CC1125 (приемопередатчик)	56
Оптроны (для передачи сигнала силовой части)	30
Итого	**203,5**

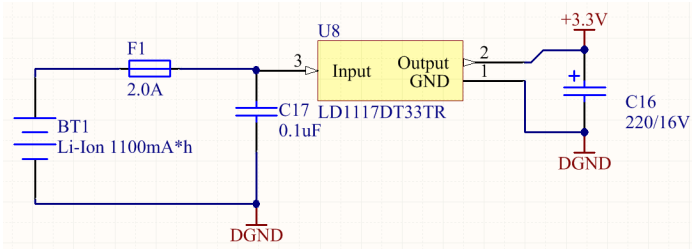


Рис. 5. Схема питания цифровой части

Расчет показывает, что при емкости аккумулятора 1,1 А·ч цифровая часть сможет работать более пять часов.

К силовой части относится цепь питания сервомашинок. При своей работе создают помехи в цепи, это может вызвать сброс микроконтроллера, неправильные измерения. К тому же им требуется повышенное, по сравнению с цифровой частью, питание – 5 В. Таким образом, мы пришли к следующей схеме (рис. 6).

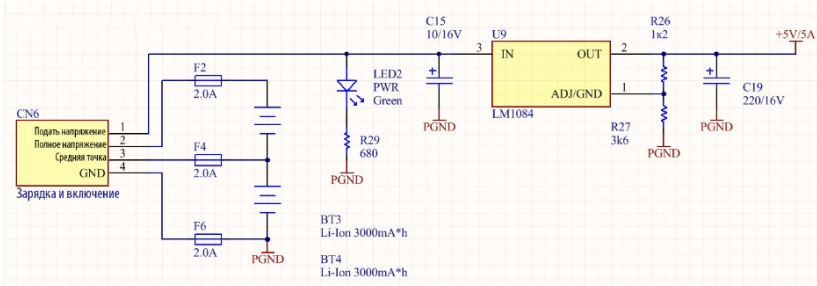


Рис. 6. Схема питания силовой части

Для зарядки ВТ3 используются выводы 2 и 3 разъема CN6, для зарядки ВТ4 – выводы 3 и 4; для запуска – замыкание вывода 1 на 2. Для обеспечения безотказной работы контакты аккумуляторов были припаяны, подпружиненный разъем не использовался.

Общие принципы

Одним из интересных конструкторских решений стало использование печатной платы в качестве вспомогательного ребра жесткости кожуха, это позволило сэкономить на массе.

Разводка печатной платы должна производилась с учетом необходимости минимизации перекрестных наводок. При монтаже радиодеталей не используются панельки микросхем; не используются реле. Это позволяет повысить надежность бортовой электроники.

Выводы

Рис. 7. Запуск

В результате опытно-конструкторской работы и имеющегося опыта команда самарского университета построила студенческую ракету (рис. 7) и бортовую электронику, обеспечивающую вывод на заданную высоту атмосферных зондов типа *CanSat*, измерение качественных показателей полета, обеспечение мягкой посадки, передача местонахождения ракеты. Выработан ряд практик разработки, повышающих надежность и безопасность.

Результат данной работы может быть полезен при разработке контроллеров БПЛА, студенческих ракет, а также в робототехнике.

Список литературы

1. *Mark V*, *Neprily*. Ракетный двигатель высокой мощности Pro75® // Корпорация Cesaroni Technology. – URL: http://www.pro38.com/products/pro75/motor/MotorData.php?prodid=2486K510-P (дата обращения: 14.11.2016).

2. ANT-433-HETH Data Sheet. – URL: http://www.linxtechnologies.com/ resources/ data-guides/ ant-433-heth.pdf (дата обращения: 01.10.2016).

3. Максимальная дальность связи по радиоканалу в системе: как этого добиться? – URL: http://www.compel.ru/lib/ne/2015/11/2-maksimalnaya-dalnost-svyazi-po-radiokanalu-v-sisteme-kak-etogo-dobitsya (дата обращения: 01.10.2016).

4. *Рутледж*, *Д.* Энциклопедия практической электроники. – М. : ДМК Пресс, 2002. – 522 с.

5. *Петунин*, *А. Н.* Методы и техника измерений параметров газового потока. – М. : Машиностроение, 1972. – 332 с.

Electronics of Student Rocket

This paper is devoted to on-board electronics design for Samara university's student rocket. The goals, objectives, and challenges faced by the developer are described. Acquired information can be used to design the atmospheric probes, navigation systems and monitoring systems.

Keywords: student’s rocket; cansat; C’Space

УДК 727.912, 727.913

В. В. Чумаков, руководитель ООО «Планетарий»
E-mail: udmsky@gmail.com
В. П. Тарануха, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «КРА»
В. А. Глушков, кандидат технических наук, доцент
E-mail: Vladimir.Glushkov@gmail.com
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
А. Г. Вшивцев, астроном-математик, лектор ООО «Планетарий»

Опыт проведения открытых занятий по астрономии в ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» в 2014–2016 гг.

Обзор практики проведения внешкольных открытых уроков по астрономии в Ижевске.

Ключевые слова: астрономия; профориентация; публичные лекции

Два десятилетия в российской школе отсутствует предмет «Астрономия». В то же время наблюдается большой интерес населения, в частности школьников, к астрономическим знаниям. Об этом свидетельствует высокая посещаемость публичных лекций, читаемых в разных городах учеными-астрономами. Но формат лекций не позволяет предоставить систематическое знание по предмету, опираясь на которое человек сможет самостоятельно выбирать и изучать научно-популярную (а может и научную) литературу. Поэтому мы решили попробовать организовать преподавание астрономии для всех желающих за пределами школы.

Прежде всего, нужно было решить некоторые организационные и методические проблемы.

Главная организационная проблема – это подходящее помещение. Первые два года уроки проводились в одной из школ города Ижевска, которую Министерство образования и науки Удмуртской Республики назначило ресурсным центром по астрономии. Опыт оказался неудачным. Ресурсные центры ориентированы исключительно на подготовку школьников к всероссийским предметным олимпиадам, в организации полноценного учебного процесса они не заинтересованы. Выбранное время занятий не устраивало администрацию школы, т. к. нужно было

© Чумаков В. В., Тарануха В. П., Глушков В. А., Вшивцев А. Г., 2017

организовать доступ на территорию не только учеников этой школы, но вообще всех желающих.

Вторая проблема – выбор времени занятий. Речь могла идти только о выходном дне. Как преподаватели, так и слушатели в будние дни заняты на своей основной работе/учебе. Многие школьники и студенты заняты ещеи полдня в субботу. Отнимать у них единственный выходной день – воскресенье – не только нецелесообразно, но и вредно. Поэтому выбрали время занятий – 15 часов в субботу.

Проблема с помещением решилась благодаря соглашению о сотрудничестве между Ижевским планетарием и ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (ИжГТУ). Важно отметить, что вуз предоставил свои ресурсы бесплатно. Одна из причин этого – предметная подготовка возможных абитуриентов, поскольку одно из направлений подготовки специалистов в ИжГТУ – это ракетно-космическая техника, для создания которой необходимы в том числе астрономические знания.

Более сложными оказались методические проблемы. С одной стороны, есть большой плюс. Наши открытые уроки посещают только те, кто сам желает изучить астрономию. Поэтому известной школьной проблемы, когда некоторым ученикам в классе давно уже не нужны никакие знания, отчего они только мешают ведению урока и постоянно нарушают дисциплину, у нас не было. Не было и проблемы обеспечения показателей успеваемости, что тяжким грузом висит на школьных учителях. Но зато возникли новые, которых нет в школе. В первую очередь, это учебная программа.

Школьный учитель ведет уроки по утвержденной сверху программе, отступление от которой карается. Программа разработана для учащихся одного года обучения и, по крайне мере, в теории, учитывает знания, которые должны быть получены на параллельных курсах. Наша аудитория состоит из людей самых разных возрастов и уровней знаний. Это и школьники 9–11-х классов, студенты первых курсов разных вузов, и взрослые люди, интересующиеся астрономией. Взять за основу какой-нибудь один учебник оказалось невозможным.

Так, учебник В. В. Воронцова-Вельяминова, по которому десятки лет учились школьники в СССР, слишком прост для студентов. К тому же его подвергают справедливой критике с точки зрения отбора материала. Первые издания вышли еще в 30-е годы XX века, когда астрофизика делала первые шаги, нынешние представления о Вселенной только формировались, и еще рано было включать их в школьные учебники. В наше время на первый план выходит именно астрофизика и в последние годы – космология. Соавторство Е. К. Страута сущест-

венно улучшило учебник, но все же он не успевает за развитием науки. Куда более подходящим оказалось учебное пособие А. В. Засова и Э. В. Кононовича. Но многие его разделы слишком трудны для школьников 9 класса.

В итоге пришлось вырабатывать программу самостоятельно методом проб и ошибок. Так, в 2015 г. мы дали полное решение задачи двух тел, сведя ее к известному школьникам уравнению гармонических колебаний. Но на этом ушло слишком много времени, и в будущем решили от этой темы отказаться. Даже сейчас, по прошествии двух лет занятий в ИжГТУ, мы не может сказать, что нашли оптимальный вариант. Однако одна идея прижилась и будет использоваться в дальнейшем – разделение курса на две части: базовую и расширенную. В базовой сообщаются основные сведения, доступные школьнику, решаются простейшие задачи. Усвоение расширенной части требует знаний основ дифференциального и интегрального исчисления, которые изучаются только в 11 классе средней школы. В расширенной части рассматриваются сведения, если можно так выразиться, не первостепенной важности: преобразования координат, проектирование орбит космических аппаратов, нестационарные звезды, понятие о теории струн и т. п.

Новым является включение в расширенную часть курса сведений по общей теории относительности, причем на более строгом уровне, нежели в популярных книгах «без формул». Так, вводится понятие метрического тензора и тензора энергии импульса, демонстрируется уравнение Эйнштейна, определяющее связь между ними. Конечно, результаты даются без вывода. В конце этой темы рассматривается практическая задача определения ускорения времени на спутнике GPS из-за ослабления гравитационного поля вдали от Земли. Сведения об ОТО помогают позже рассмотреть простейшую модель расширяющейся Вселенной – модель де Ситтера – не только на словах, но и в уравнениях.

Неизменно курс заканчивается проблемой возникновения жизни на Земле и поисков ее во Вселенной. Здесь наш астрономический курс тесно смыкается с биологией.

Выводы

Работа над программой курса продолжается. Ее совершенствованию мешает пока слабая обратная связь. Если от специалистов-астрономов поступают критические отзывы, то от слушателей отзывов практически нет. Эту и другие проблемы будем, несомненно, решать.

Experience of open lessons on astronomy in Kalashnikov Izhevsk State Technical University (2014–2016)

There given an overview of the acquired experience of public open lectures and lessons on Astronomy for school and university students performed in Izhevsk.

Keywords: astronomy; occupational guidance; open public lectures

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

УДК 365+69.001.5

A. Belal, Master's Degree Student
E-mail: ali.bilal73@yandex.ru
M. Gharib, Master's Degree Student
E-mail: majdgharib@yandex.com
A. N. Zorin, PhD, associate professor, head of the Department of Architecture
E-mail: arh@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Design and Psychological Benefits of Using 3D Printing for Temporary Emergency Housing. Case Study: Za'atari Camp in Jordan

This review presents an overview on the classic methods of designing and constructing emergency housing for displaced people, then draws attention to the possible role of advanced modern technology to increase the speed and efficiency of this housing type. In addition, the review indicates to the importance of considering mental health as a major factor during the design of emergency-related shelter.

Keywords: Postwar Psychology; Emergency Shelters/Housing; 3D Printing; Mental Health; Za'atari Camp

Introduction

The Syrian ongoing conflict has displaced almost five million Syrian people, most of them are in neighboring countries such as (Lebanon, Jordan, and Turkey) while others have moved to other distant countries [1]. In addition, more than six million people are internally displaced [2]. A lot of these people live in various refugee camps. Some of these camps lack the basic living requirement and have horrible living conditions which in turn could lead to devastating consequences on mental health of the refugees [3–4].

In this context, the architectural considerations seem to have a major role in this low living situations which poses the question of how could relevant

© Belal A., Gharib M., Zorin A. N., 2017

organizations such as the United Nations High Commissioner for Refugees (UNHCR) put more effort in the design process, and make better shelters in refugee camps while maintaining or improving time needed for both designing and execution of these housing units, and also their efficiency?

Design factors in case of emergency housing

Buildings and physical structures are designed by architects simply to serve specific functions related to specific factors. The style of design and method of construction are chosen based on knowledge of art, science, technology and humanity [5]. In some cases, such as emergency housing, this becomes inapplicable for various reasons explained in this section.

The Architectural factors

The Roman architect Vitruvius wrote in his book De Architectura explaining the major aspects of an architectural work which is a building or any other physical structure. These aspects according to him are: Durability, Utility, and Beauty. This means that a building should resists various harmful conditions and remain in good condition, and on the other hand, it have to be suitable to serve the purposes for which it is designed and used, while being aesthetically pleasing [6]. Even though these are ancient aspects, they are still major aspects used in today's architecture, however, the depth of these aspects in increased and their relative importance depends on the architectural school that the building belongs to [7].

Emergency housing characteristics

Emergency housing is a solution for extreme conditions that could be happening to one person or even millions of people in case of war for example. These shelters usually include the most basic kind of structure built to assist refugees of a conflict or natural disaster and acts as a temporary residence for those who have lost or abandoned their homes [8].

When examining the emergency housing/shelter provided by the UNHCR to look for the previously mentioned architectural aspects, we observed that they are not fully applied as the definition of a shelter by this organization is: «Shelter is a vital survival mechanism in times of crisis or displacement» and in the description, the UNHCR lists the types of shelter provided be them which are tents distribute plastic sheeting [8]. These types of buildings might be good to provide quick and acceptable protection against external dangers such as weather conditions and other environmental hazards. Even though these shelters can actually be the difference between life and death, they are unable to effectively protect their inhabitants against other types of hazards like the extreme weather conditions or incidents of Gender-Based violence. Thus, these structures lack the durabil-

ity [9]. In addition, and as they are designed for the purposes of rushing aid and restoring a sense of home to refugees, beauty of design is slightly or even never considered as a factor [8]. Such designs might have measurable impact on the mental health of their inhabitants [10].

The impact of mental health as a design factor

The majority of displaced Syrian people have witnessed violence and some of them were direct victims of violent acts related to war which resulted in high incidence of mental disorder among Syrian refugees. Furthermore, the very fact of resettling in a new country adds more daily stressors. This stress is related to many problems such as "language barriers, poverty, lack of resources and services to meet basic needs, difficulty accessing services, risks of violence and exploitation, discrimination and social isolation" [3]. Such circumstances can lead to developing mental disorders among refugees or participate into worsen already existing mental illnesses [4].

In this regard, some studies suggested promoting more safety and security within the refugee camps and expanding access to recreational areas, especially for children, as they constitute necessary protective factors to support mental well-being [11]. Such suggestions and considerations can be made by providing more suited living environments which are culturally safe by taking the cultural aspects into consideration in the design process of these shelters [3].

The possible role of modern technology in emergency housing

One of the most advanced modern technologies that could be very suitable for such tasks is three-dimensional printing (3D printing).

Overview on 3D printing

3D Printing Technology, or additive manufacturing, is a fully automated process for making three-dimensional, solid objects from digital designs. The process begins by digitally modeling a blueprint of the object that is to be printed in a design program. The design program then slices the object into layers and sequentially sends this information to the 3D printer [12].

3D Construction and Architecture

There are prototype printer systems that use concrete and other more specialized materials to create a structure similar to a small house. The goal is the replace many cranes and even construction workers with these printing systems [13].

Advantages and Uses of 3D Printing

1. Building in Non-Traditional Forms: 3D printing has the ability to overcome obstacles in realizing architects designs.

2. Time and Cost: 3D printing allows a house, or ten houses, to be built in a day, there will be an obvious reduction in the time, and hence the money, required for construction.

3. The condensed time frame and automation will reduce the man hours required for each project, both for direct labor and supervision. Less time will also demand less financing costs and overhead.

4. The printing technology may also reduce material costs and increase flexibility with what materials may be used [12].

The proposed relationship with the Emergency Construction Industry

Even though 3D printing is still in its early stages, innovators are working on technology that they hope will make it possible to print whole structures. This makes 3D printing a very strong candidate to play a major role in the future as an alternative method for building better refugee camp units for housing proposes. The importance of 3D printing is that by enabling geometrical complexity, multifunctionality and structural effects can be induced in the printed objects [12, 14].

This means unlimited options in choosing the design of the houses while maintaining low cost construction which is more durable that usual tents and very quickly executed.

The case of Za'atari Camp

Overview

This camp was built to host Syrian refugees in Jordan and first opened on 28th July 2012. The camp is now the 4th largest 'city' in the Hashemite Kingdom of Jordan with over 100,000 inhabitants and new arrivals continuing to flood in each day, which was initially designed to host a maximum of 60,000 inhabitants. The camp is made up of 30,000 shelters and administration buildings, three hospitals, three schools, and a market-like structure of 3,000 makeshift shops. Its residential buildings consist of tents distributed by the UNHCR, or shelters, at best a precast caravan [15].

In details, there have been more than 450,000 refugees who have passed through the camp at some point and an average of 80 births per week. The Camp covers around 5.3 km^2 and contains some community based services, nine schools where 20,771 school-aged children are enrolled. There are also 27 community centers that provide psychosocial support and some recreational activities. In addition, there are two hospitals nine health care centers [16].

While this might give the impression of a fully functional, highly equipped camp, a lot of the refugees there have developed serious mental

health problems or their existing situation was worsened due to very bad living conditions and lack of adequate support and suitable housing (see Fig. 1 [15]), taking into consideration the fact that this type of accommodation was not designed to host people for this long period of time and is unable to support these huge numbers sufficiently [3–4].

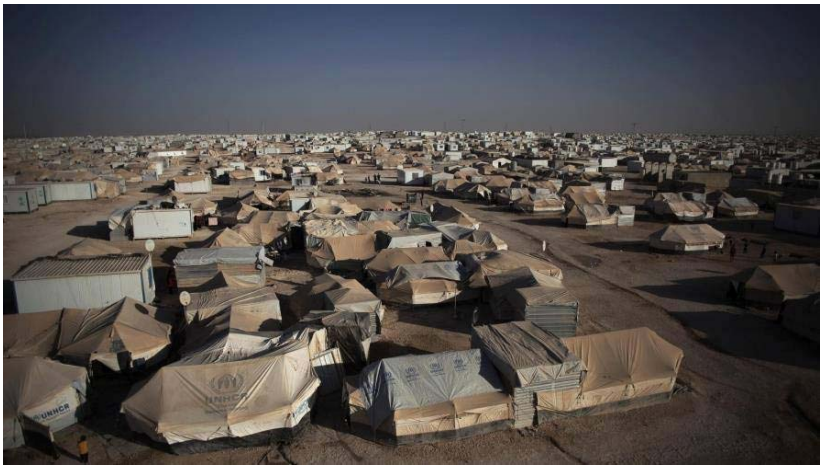


Fig. 1. Tents for emergency housing in Za'atari Camp

There is some evidence that adequate family and community support may reduce distress in refugees over time [4], however, this can be improved even more by taking into account improving the living environment where these people live as there is strong evidence of the impact of environment of mental health. This impact is proved to have somatic and mental recovery benefits against mental disorders including Posttraumatic Stress Disorder (PTSD), Anxiety and Stress which are highly common among refugees [10].

On the other hand, housing types – which seem to be the main problem – can be improved to meet the three aspects of successful architecture which are durability, utility, and beauty [6]. This can be done using 3D printing technology as it is capable of creating a big range of designs that should be chosen to be appropriate for the nationality of the refugees. This means choosing designs that are based on the types of accommodation that these people are used to live in, in terms of shape and functionality, while durability should be maintained in accordance with the factors of the given situation [10, 11, 15, 16].

Conclusion and Discussion

The bad circumstances of war put people under a lot of stressors and might cause them to live with some sorts of war-related mental illnesses. These disorders might become worse in refugee camp settings which lack of basic living standards in some cases. In such cases, housing type seems to be one of the most important reasons causing these bad conditions. 3D printing can play a major role in creating better accommodations because of its ability to create a wide range of shapes and geometric forms which could, at least, help creating better looking camps that look more like the original housing types of the refugees. Furthermore, we suggest that cultural considerations are takin into account in any future refugee camp design as such factors might have great positive impact on mental health of refugees especially if combined with better accessibility to recreational areas and natural environment settings.

References

1. *Mcneely*, *C. A.*, *Morland, L*. (2016). The Health of the newest americans: How US public health systems can support Syrian refugees. Am J Public Health, 106(1), 13–15. doi:10.2105/ajph.2015.302975.

2. About the Crisis. (n.d.). – Retrieved. – November 13, 2016 // http://www.unocha.org/syrian-arab-republic/syria-country-profile/about-crisis

3. Mental health and psychosocial wellbeing of Syrians affected by armed conflict / G. Hassan, P. Ventevogel, H. Jefee-Bahloul, A. Barkil-Oteo, L. J. Kirmayer // Epidemiol Psychiatr Sci Epidemiology and Psychiatric Sciences. – 2016. – 25 (02). – 129–141. doi:10.1017/s2045796016000044.

4. Culture, context and the mental health and psychosocial wellbeing of Syrians: a review for mental health and psychosocial support staff working with Syrians affected by armed conflict / G. Hassan, L. J. Kirmayer, A. Mekki-Berrada, C. Quosh, R. el Chammay, J. B. Deville-Stoetzel, A. Youssef, H. Jefee-Bahloul, A. Barkeel-Oteo, A. Coutts, S. Song & P. Ventevoge. – Geneva: UNHCR, 2015.

5. *Trumble*, *W.* (2002). Shorter Oxford English dictionary on historical principles / W. Trumble, A. Stevenson & L. Brown. – Oxford New York: Oxford University Press. – ISBN 0-19-860575-7.

6. Morgan, *M. H.* Vitruvius, the ten books on architecture // Place of publication not identified: Nabu Press. – 2010.

7. *Hall*, *P*. Urban and Regional Planning : 4th ed. – London: Routledge. – 1992.

8. Shelter: alternatives to camps (n.d.) | UNHCR: The UN Refugee Agency. Retrieved November 13, 2016, from http://www.unhcr.org/shelter.html

9. Better shelter unit (refugee housing unit) (n.d.) | Retrieved November 13, 2016, from http://innovation.unhcr.org/labs_post/refugee-housing-unit

10. *Golembiewski*, *J. A*. The designed environment and how it affects brain morphology and mental health // HERD: Health Environments Research & Design Journal. – 2015. – 9(2). – 161–171.

11. *Baker*, *N*. (n.d.). Current research on the mental health of Syrian refugees. PsycEXTRA Dataset. doi:10.1037/e529032015-001

12. *Doely*, *P. K*. 3D Printing: a new dimension in construction | Fabyanske Westra Hart & Thomson | Minneapolis Construction Lawyer. Retrieved November 14, 2016. – 2014 // http://fwhtlaw.com/briefing-papers/3d-printing-new-dimension-construction

13. Introduction to 3D Printing (n.d.). Retrieved November 14, 2016 // https://education.gov.mt/en/resources/News/Documents/Youth Guarantee/3D Printing.pdf

14. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders / C. Gosselin, R. Duballet, P. Roux, N. Gaudillière, J. Dirrenberger, P. Morel // Materials & Design, 100. – 2016. – 102–109. doi:10.1016/j.matdes.2016.03.097

15. The Zaatari refugee camp. (n.d.). Retrieved November 14, 2016 // http://www.livedprojects.org/zaatari-refugee-camp

16. Zaatari refugee camp. Factsheet (April, 2015). Retrieved November 14, 2016 // http://data.unhcr.org/syrianrefugees/download.php?id=8645

УДК 620.179.16

А. В. Байтеряков, аспирант
Р. С. Казаков, магистрант
E-mail: pmkk@istu.ru
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), СибГИУ (г. Новокузнецк)
М. А. Синцов, зав. лабораторией «Физические методы контроля»
Инжиниринговый центр «ИжСпецТех»

Скорость ультразвуковых волн в рельсах с наработкой

Исследовано изменение скоростей распространения головных и поверхностных волн в отрезках рельсов с разной степенью наработки. Показано влияние срока эксплуатации рельсов на измеряемые акустические параметры в сравнении с неэксплуатировавшимися рельсами.

Ключевые слова: акустический контроль; головные волны; поверхностные волны; грузонапряженность; рельсы

Введение

Рельсы на железнодорожных путях находятся под циклическим воздействием подвижного состава, а также непрерывно подвергаются воздействию природных и других факторов, что приводит к неизбежному образованию дефектов и повреждений.

Главной задачей в обеспечении безопасности движения поездов является своевременное выявление на ранней стадии развития трещин в рельсах, а также важно локализовать участок рельса на стадии предразрушения [1–12].

Наиболее тесный физический контакт происходит между поверхностью катания головки рельса и колесной парой подвижного состава [13–14]. Далее в работе рассмотрены зависимости влияния грузонапряженности рельсов на скорости распространения поверхностных и головных.

Используемые подходы

Исследования проведены на восьми рельсах с разными годами изготовления и различной степенью износа (табл. 1).

Все нижеследующие измерения проводились со стороны поверхности катания головки рельсов. Измерение скоростей поверхностных волн Рэлея выполнено с помощью электромагнитно-акустического (ЭМА)

© Байтеряков А. В., Казаков Р. С., Синцов М. А., 2017
Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-12-00010).

преобразователя [15–23] поверхностных волн на частоте 1,25 МГц. Регистрация импульсов осуществляется специально разработанным электромагнитно-акустическим структуроскопом (СЭМА) [24–26], внесенным в реестр средств измерений Госстандарта (госреестр № 61957-15). ЭМА-преобразователь устанавливается на середину поверхности катания головки рельса. Поверхностная волна при этом распространяется вдоль проката рельса. Схема установки приведена на рис. 1.

Таблица 1. **Характеристика рельсов**

№ рельса	Год изготовления	Наработка, млн т брутто
1	2013	нет
2	2013	нет
3	1996	400
4	1996	400
5	–	после эксплуатации
6	–	600
7	1984	840
8	1985	990

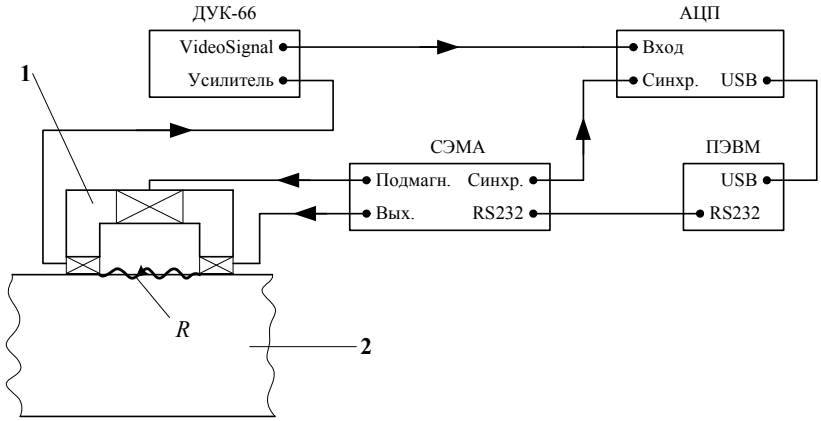


Рис. 1. Схема измерений скоростей поверхностных волн:
1 – ЭМА-преобразователь; *2* – рельс; *R* – поверхностная волна

На ПЭВМ в программе для регистрации аналоговых сигналов «ПРИНЦ VIII» фиксируется время прихода поверхностной волны. На рис. 2 приведена часть интерфейса программы.

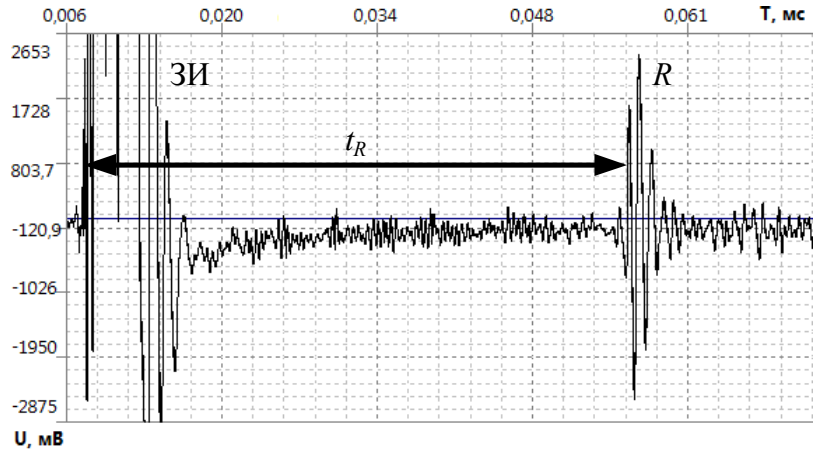


Рис. 2. Регистрация поверхностной волны в программе «ПРИНЦ VIII»: ЗИ – зондирующий импульс; *R* – поверхностная волна; *tR* – время распространения поверхностной волны

База ЭМА-преобразователя $l_{\text{ЭМАП}}$ составляет 140 мм. Скорость поверхностной волны c_R вычисляется по формуле

$$c_R = \frac{l_{\text{ЭМАП}}}{t_R}. \quad (1)$$

Скорости головных волн измерялись с помощью разработанного пьезоэлектрического раздельно-совмещенного преобразователя с углом ввода 27°. Для возбуждения и регистрации ультразвуковых волн использован дефектоскоп DIO1000 SFE ф. Starmans. Генератор дефектоскопа настроен на частоту 1,25 МГц. Схема измерения скоростей головных волн приведена на рис. 3.

При установке преобразователя на объект контроля на дисплее дефектоскопа отображается дефектограмма (рис. 4).

Дефектоскоп DIO1000 SFE позволяет сохранять результат измерений в текстовый файл для дальнейшей обработки в различных программных продуктах.

Для учета времени задержки ультразвуковой волны в призме преобразователя использован стандартный образец СО2 следующим образом. Известно [27], что скорость головной волны равна скорости продольной волны (для СО2 c_{CO2} = 5900 м/с). Зная базу преобразователя $l_{\text{П}}$ = 72,4 мм, можно вычислить время распространения головной волны t_{CO2} в СО2.

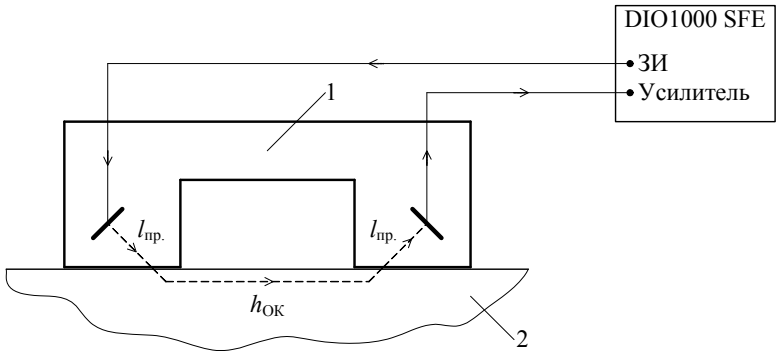


Рис. 3. Схема измерения скоростей головных волн: *1* – раздельно-совмещенный преобразователь, подключенный к дефектоскопу; *2* – объект контроля; $l_{пр}$ – продольная волна в преобразователе; $h_{ОК}$ – головная волна в объекте контроля

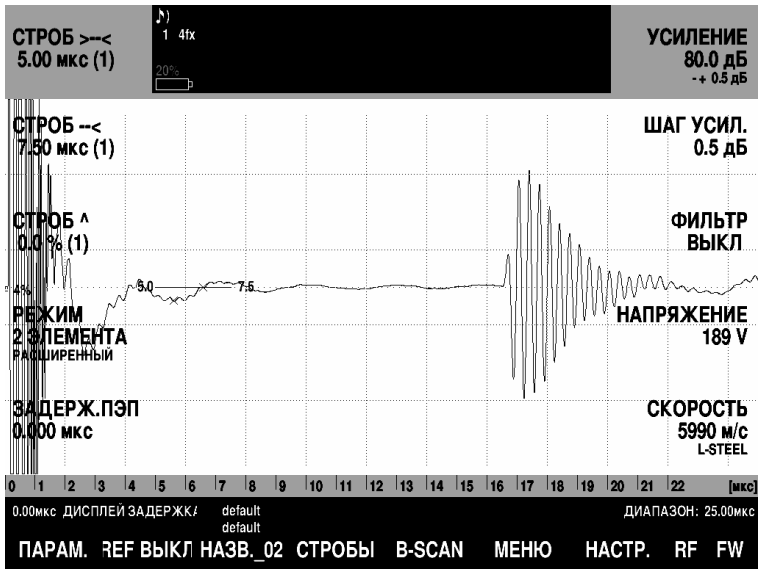


Рис. 4. Дефектограмма контроля с дефектоскопа DIO1000 SFE (справа – зондирующий импульс, слева – зарегистрированная головная волна)

Сохраненные в текстовых файлах результаты измерений для стандартного образца СО2 и восьми рельсов далее обрабатывались в программной среде WinПОС с помощью функции взаимной корреляции

[28], которая позволяет вычислить задержку Δt между временем распространения головной волны в образце CO2 и рельсе [29]. Результат работы функции для рельса № 2 приведен на рис. 5.

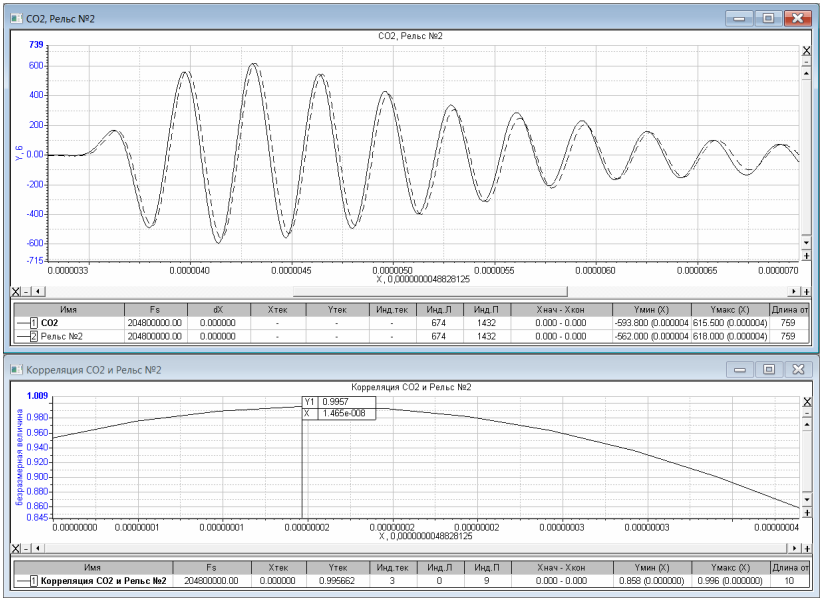


Рис. 5. Демонстрация работы функции взаимной корреляции в программной среде WinПОС. Задержка составляет 14,65 нс

Тогда скорость головной волны в рельсах c_C вычисляется по формуле

$$c_C = \frac{l_{\text{П}}}{t_{\text{CO2}} + \Delta t}. \qquad (2)$$

Результаты обработки измерений

График со скоростями поверхностных волн представлен на рис. 6. Из-за растрескивания поверхности катания головки в рельсе № 8 поверхностную волну возбудить не удалось.

Как видно из графика (рис. 6), скорости поверхностных волн в новых рельсах на 8–14 м/с выше, чем в рельсах с наработкой. Исключение составляет рельс № 5, у которого отсутствует идентификация по году изготовления и эксплуатационной наработке.

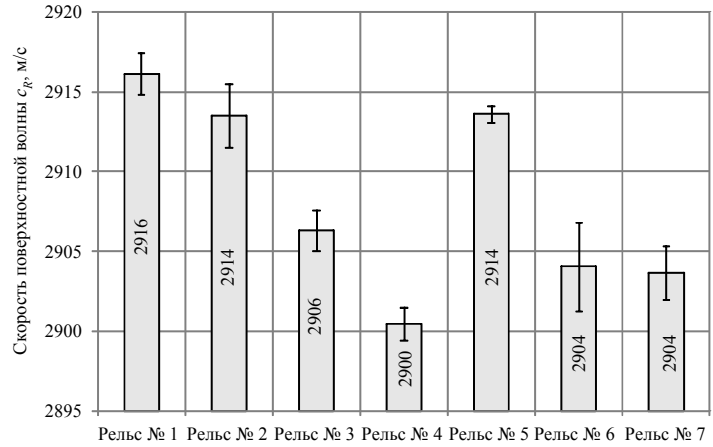


Рис. 6. Скорости поверхностных волн

График скоростей головных волн в рельсах приведен на рис. 7.

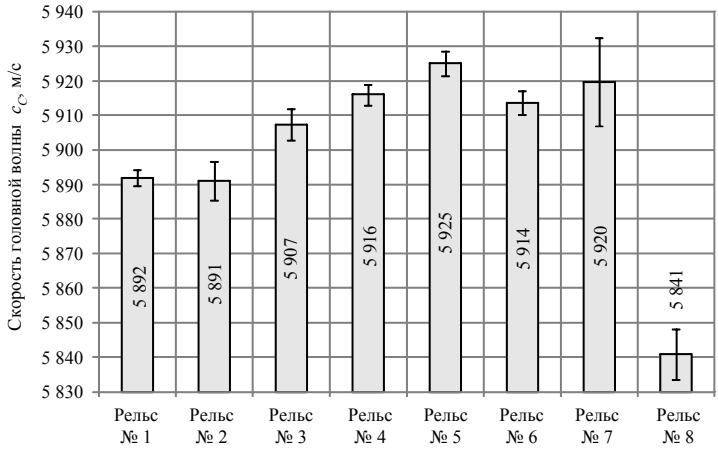


Рис. 7. Скорости головных волн

Скорости головных волн в неэксплуатировавшихся рельсах ниже на 16-34 м/с, чем в рельсах с наработкой. Исключение составляет рельс № 8, в котором скорость головной волны ниже на 50 м/с чем в новых рельсах, что вероятней всего связано, как уже говорилось выше, со значительным растрескиванием поверхности катания.

Выводы

Волны Рэлея, являющиеся чувствительными к дефектам поверхности, подтверждают наличие наклепа и накопленной дефектности [30, 31] в поверхности катания головки рельсов, находящихся в эксплуатации в течение длительного времени.

Скорости головных волн в неэксплуатировавшихся рельсах ниже, чем в рельсах с наработкой.

Список литературы

1. Диагностика, повреждаемость и ремонт барабанов котлов высокого давления / Н. В. Абабков, Н. И. Кашубский, В. Л. Князьков [и др.] ; под ред. А. Н. Смирнова. – М., 2011. – 256 с.

2. Влияние одноосного растяжения образцов стали 09г2с после различной термической обработки на акустические структурные шумы / В. В. Муравьев, С. В. Леньков, А. И. Дедов, А. В. Байтеряков, А. Ю. Котоломов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59. № 2. – С. 118–122.

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

4. *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.

5. *Муравьев*, *В. В.* Оценка роста усталостных трещин в боковых рамах тележек грузовых вагонов акустико-эмиссионным методом / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 9. – С. 24–29.

6. Оценка уровня акустических структурных шумов при одноосном растяжении плоских образцов трубной стали 09Г2С после различной термической обработки / В. В. Муравьев, А. В. Байтеряков, А. И. Дедов, О. В. Муравьева, С. В. Леньков // Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 10. – С. 40–46.

7. *Муравьев*, *В. В.* Физические основы и технологии акустико-эмиссионного контроля на железнодорожном транспорте : учеб. пособие / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2014. – 398 с.

8. *Смирнов*, *А. Н.* Зависимость локальных деформаций и полей внутренних напряжений от способа сварки конструкционной стали ВСТ3СП. 1. Влияние способа сварки на механические характеристики и параметры акустической эмиссии стали ВСТ3СП / А. Н. Смирнов, В. И. Данилов, Е. А. Ожиганов, В. В. Горбатенко, В. В. Муравьев // Дефектоскопия. – 2015. – № 11. – С. 59–67.

9. *Смирнов*, *А. Н.* Критерии оценки технического состояния длительно работающего металла оборудования ТЭС на основе акустической структуроскопии / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, В. В. Муравьев, С. В. Фольмер // Дефектоскопия. – 2015. – № 2. – С. 44–51.

10. *Степанова*, *Л. Н.* Связь спектра сигналов АЭ с процессом усталостного развития трещин в металлических образцах / Л. Н. Степанова, А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, А. Л. Бобров, В. Н. Чаплыгин, Е. Ю. Лебедев, С. И. Кабанов, С. А. Катарушкин, В. Л. Кожемякин // Контроль. Диагностика. – 1999. – № 2. – С. 5–8.

11. Location of acoustic emission signals in metallic constructions / A. N. Sereznov, V. V. Muravev, L. N. Stepanova, S. B. Barabanova, V. L. Kozhemyakin, S. I. Kabanov // Дефектоскопия. – 1997. – № 10. – С. 79–84.

12. Rapidly working diagnostic acoustic emission system / A. N. Sereznov, V. V. Muravev, L. N. Stepanova, S. I. Kabanov, V. L. Kozhemyakin, A. E. Eltsov, E. Yu. Lebedev // Дефектоскопия. – 1998. – № 7. – С. 8–14.

13. Акустическая тензометрия и структуроскопия железнодорожных колес : моногр. / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Л. В. Волкова, Е. Н. Балобанов ; отв. ред. В. В. Муравьев. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2014. – 180 с.

14. 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.

15. *Буденков*, *Г. А.* Исследование напряженно-деформированного состояния ободьев цельнокатанных вагонных колес методом акустической тензометрии / Г. А. Буденков, В. В. Муравьев, О. В. Коробейникова // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2009. – Т. 6. – № 3. – С. 111–117.

16. *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.

17. Исследования акустоупругих характеристик стержневой волны в термически обработанных стальных проволоках электромагнитно-акустическим методом / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. В. Платунов, Д. В. Злобин // Дефектоскопия. – 2012. – № 8. – С. 3–15.

18. Распределение остаточных напряжений при электроконтактном упрочнении бандажей локомотивных колес / В. В. Муравьев, С. Ю. Петров, А. В. Платунов, Е. Н. Балобанов, Л. В. Волкова, А. А. Рябов, О. В. Соколов, Т. П. Печенова, В. В. Костюк // Технология машиностроения. – 2011. – № 9. – С. 42–45.

19. *Муравьев*, *В. В.* Оценка величины натяга бандажей локомотивных колес методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова // Дефектоскопия. – 2013. – № 9. – С. 40–46.

20. *Муравьев*, *В. В.* Оценка остаточных напряжений в рельсах с использованием электромагнитно-акустического способа ввода-приема волн / В. В. Му-

равьев, Л. В. Волкова, В. Е. Громов, А. М. Глезер // Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 12. – С. 34–37.

21. *Муравьев*, *В. В.* Экспериментальная оценка остаточных напряжений и натяга бандажей локомотивных колес методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2016. – № 4. – С. 98–104.

22. *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.

23. Оптимизация систем подмагничивания проходных электромагнитно-акустических преобразователей объемных волн для неразрушающего контроля пруткового проката / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, Е. Н. Кокорина, В. Д. Стерхов, Д. В. Малютин // Датчики и системы. – 2013. – № 2(165). – С. 2–9.

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

25. *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.

26. *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.

27. *Ермолов*, *И. Н.* Неразрушающий контроль : справ. : в 7 т. – Т. 3 Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге ; под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2004. – 835 с.

28. 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.

29. *Муравьев*, *В. В.* Влияние эксплуатационной грузонапряженности рельсов на акустические структурные шумы / В. В. Муравьев, А. В. Байтеряков // Дефектоскопия. – 2016. – № 11. – С. 50–58.

30. *Муравьев*, *В. В.* Взаимосвязь скорости ультразвука в сталях с режимами их термической обработки // Дефектоскопия. – 1989. – № 2. – С. 66–68.

31. *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.

The Speed of Ultrasonic Waves in Rails with Oparating Time

The change of the propagation velocity of surfaces and creep waves in rails parts with different operating time was investigated. The influence of the rails operating time on the measured acoustic parameters in comparison with the new rails is discussed.

Keywords: ultrasonic inspection; creep waves; surface waves; traffic density; rails

УДК 621.3.082.722

Е. С. Биринцева, студент
М. В. Смольников, студент
С. А. Мурашов, кандидат технических наук, доцент
E-mail: sm-ii@yandex.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
Д. С. Мурашова, инженер
ООО «ИРЗ-Тест», г. Ижевск

Теоретическая оценка параметров емкостного датчика для измерения статического давления при компрессии мягких биологических тканей

Выполнена оценка чувствительности идеального датчика давления емкостного типа, пространство между пластинами которого заполнено силиконовым компаундом, при измерении давлений 1–10 кПа при компрессии мягких биологических тканей, предложены оптимальные размеры пластин.

Ключевые слова: емкостной датчик давления; эластография

На кафедре ПМИКД разработан метод статической эластографии [1–3], позволяющий выполнять количественную оценку упругих модулей, основанный на математическом моделировании процесса деформации с учетом геометрических и физических параметров объекта исследования. Метод предполагает измерение давления при компрессии путем расположения буферной емкости с жидкостью между ультразвуковым (УЗ) преобразователем и телом пациента и измерением возникающего в ней статического давления.

Практическое использование такой измерительной системы выявило ряд недостатков: большой размер буферной емкости с жестким каркасом затрудняет позиционирование УЗ-датчика и поиск внутреннего органа в процессе обследования пациента; двухкратное прохождение ультразвукового сигнала через буферную емкость ухудшает качество В-изображения (возможны появление реверберациий от стенок буферной емкости, затрудняющих определение границ неоднородностей,

© Биринцева Е. С., Смольников М. В., Мурашов С. А., Мурашова Д. С., 2017

Работа выполнена по государственному заданию Министерства образования и науки РФ ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова» на 2014–2016 гг. в рамках проектной части проведения научно-исследовательских работ (проект № 3.751.2014/К).

и снижение контрастности); необходимость калибровки после любого изменения количества жидкости в буферной емкости, в том числе после длительного хранения или многократной эксплуатации. Для устранения недостатков требуется поиск или разработка более компактных, надежных и достаточно чувствительных датчиков давления, удовлетворяющих задачам статической эластографии при измерениях в пределах 20 кПа.

Для измерения небольших статических давлений имеет смысл теоретически оценить чувствительность емкостных датчиков давления вследствие их достаточно высокой точности, стабильности во времени, меньшей зависмости от температуры, по сравнению с резистивными (тензометрическими) датчиками, и от частоты напряжения питания, по сравнению с индуктивными датчиками. Недостатками датчиков емкостного типа являются необходимость защиты от внешних электрических полей (помех) и относительная сложность автоматизации измерения выходного параметра датчика – электрической емкости – с отстройкой от электрических параметров датчика, обусловленных его конструкцией [4].

Для обеспечения достаточной чувствительности емкостного датчика при эластографии необходимо подобрать упругий материал между обкладками датчика с модулем Юнга, в несколько раз превышающим модуль Юнга исследуемых мягких тканей (для лучшей передачи давления в них), способный восстанавливать форму и объем после деформации. Диапазон значений модуля Юнга для биологических мягких тканей достаточно широк: от 1 кПа (жировая ткань) до 10^4 кПа (соединительная ткань, кожа). Ввиду того, что кожа – ткань очень тонкая и имеет складки, она практически не препятствует компрессии, поэтому достаточно учитывать упругие свойства внутренних тканей и органов. Так, для измерения давлений, оказываемых на печень, модуль Юнга которой в здоровом состоянии находится в диапазоне 0,4–6 кПа, а при патологиях, например, циррозе, может достигать значений порядка 100 кПа [5], предпочтителен материал между обкладками конденсатора, имеющий модуль Юнга $E = 30…300$ кПа. Близкими к требуемым свойствами обладает силиконовый компаунд Эластолюкс-М. Экспериментальное значение модуля Юнга E для специально изготовленного образца в виде затвердевшего силиконового компаунда Эластолюкс-М при массовом соотношении жидкого силикона к катализатору 1:1,5 составляет 300±50 кПа. Материал обладает термостойкостью до 200 °С.

Под действием измеряемого статического давления компрессии P_0 материал между обкладками конденсатора будет сжиматься, а расстоя-

ние d – уменьшаться пропорционально давлению на обкладки $P \le P_0$. Относительная деформация $\varepsilon_{мех} = \Delta d / d$ при этом выражается линейным законом Гука:

$$P = E\varepsilon_{мех}. \quad (1)$$

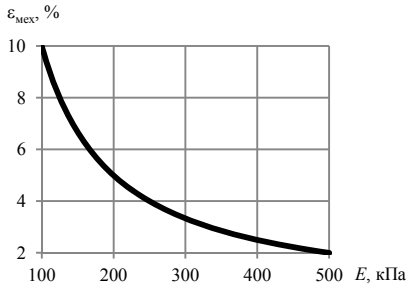


Рис. 1. Теоретическая зависимость деформации $\varepsilon_{мех}$ от модуля Юнга E при P = 10 кПа

На рис. 1 представлена теоретическая зависимость $\varepsilon_{мех}$ от E при давлении P = 10 кПа, из которой следует, что для силикона Эластолюкс-М с модулем Юнга 300±50 кПа теоретическое значение относительной механической деформация $\varepsilon_{мех}$ находится при указанном давлении в пределах 3–4 %, а при давлении 1 кПа – в пределах 0,3–0,4 %.

Для предварительной оценки электрических параметров емкостного датчика давления за основу может быть взята модель плоского конденсатора, электрическая емкость C которого рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d}, \quad (2)$$

где ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость (для силикона $\varepsilon_r \approx 3$); $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – абсолютная диэлектрическая проницаемость; S – площадь обкладок конденсатора; d – расстояние между обкладками конденсатора.

Теоретические зависимости электрической емкости C от диаметра D обкладок круглой формы при различных расстояниях d между обкладками представлены на рис. 2. Очевидно, что для повышения емкости C следует уменьшать расстояние d и увеличивать диаметр обкладок D. При эластографии требуется выполнять компрессию мягких тканей и органов человека, что ограничивает размер контактной площадки и толщину корпуса датчика давления, находящегося в руках врача-диагноста или его ассистента, диаметрами 40…60 мм. Таким образом, при D = 40 см и при толщине слоя диэлектрика (Эластолюкс-М) d = 2 мм электрическая емкость C составит 16 пФ, а при d = 1 мм – 30 пФ.

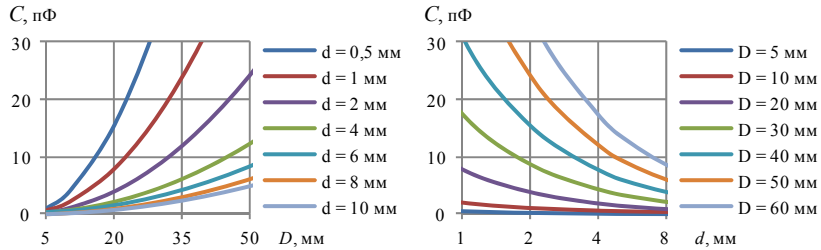


Рис. 2. Зависимости емкости плоского конденсатора от диаметра обкладок D и расстояния между ними d

Размеры конденсатора существенно влияют на его электрические параметры, чувствительность к механическим деформациям (давлению) и помехозащищенность. В таблице представлены значения емкости конденсатора C, а также ее изменения ΔC при деформациях (уменьшении толщины Δd) материала между обкладками под действием давления P, равного 1 и 10 кПа, рассчитанные для некоторых соотношений расстояния между обкладками d и их диаметром D. Независимо от размеров конденсатора, относительное изменение электрической емкости $\Delta C/C$ составляет 0,3 % при давлении P = 1 кПа и 3 % при давлении P = 10 кПа.

Параметры плоского конденсатора при давлениях 1 и 10 кПа, влияющие на чувствительность емкостного преобразователя

D, мм	d, мм	C, пФ	P = 1 кПа		P = 10 кПа	
			Δd, мкм	ΔC, пФ	Δd, мкм	ΔC, пФ
20	1	8,3	2,9	−0,024	29	−0,25
20	2	4,2	5,7	−0,012	57	−0,12
20	4	2,1	11,4	−0,006	114	−0,06
40	1	33,4	2,9	−0,096	29	−0,98
40	2	16,7	5,7	−0,048	57	−0,49
40	4	8,3	11,4	−0,024	114	−0,25
60	1	75,1	2,9	−0,215	29	−2,21
60	2	37,6	5,7	−0,108	57	−1,10
60	4	18,8	11,4	−0,059	114	−0,55

Таким образом, электрические и геометрические параметры плоского конденсатора с мягким силиконом в качестве прокладки между его пластинами теоретически обеспечивают возможность разработки датчика давления емкостного типа для измерения статических давле-

ний при эластографии, если расстояние между пластинами не будет превышать 1–2 мм при их диаметре не менее 40 мм. Однако для улучшения чувствительности имеет смысл использовать материал с меньшим значением модуля Юнга или большей диэлектрической проницаемостью, чем рассматриваемый в данной статье силикон.

Список литературы

1. Capabilities of elastography methods in ultrasound diagnostics / O. V. Muravieva, O. P. Bogdan, S. A. Murashov, D. S. Murashova // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS) (16–18 Oct. 2014, Tomsk, Russia). – P. 1–6. – DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986937.

2. Elasticity Moduli Estimation Using Different Elastography Methods: A Phantom Based Approach / D. S. Murashova, S. A. Murashov, S. A. Bogdan, S. A. Muravieva, E. P. Kuznetsov, S. O. Yugova // Instrumentation engineering, electronics and telecommunications – 2015 : Paper book of the I International Forum (November, 25–27, 2015, Izhevsk, Russia). – Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2016. – 208 p.

3. Исследование статической эластографии методом математического моделирования / О. В. Муравьева, Д. С. Мурашова, С. А. Мурашов, О. П. Богдан // Медицинская техника. – 2014. – № 3. – С. 31–34.

4. *Мелентьев*, *В. С.* Оценка влияния параметров измерительного преобразователя на погрешность измерения параметров емкостного датчика / В. С. Мелентьев, К. Д. Левина, А. В. Уколов // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2016. – № 6–1. – С. 67–70.

5. *Осипов*, *Л. В.* Технологии эластографии в ультразвуковой диагностике. Обзор // Медицинский алфавит. – 2013. – № 3–4. – С. 1–39.

Theoretical Evaluation of Parameters of a Capacitive Sensor for Measuring the Static Pressure During Compression of Soft Biological Tissues

The paper contains the results of sensitivity evaluation of the perfect capacitive pressure sensor, the space between the plates of which is filled with silicone compound, when measuring the pressures in range of 1–10 kPa during compression of soft biological tissues; the optimum sizes of the sensor plates are proposed.

Keywords: capacitive pressure sensor; elastography

УДК 615.47:616.073

О. П. Богдан, кандидат технических наук, доцент
Ю. С. Дудина, аспирант
Н. А. Бабайлов, магистрант
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Оценка интенсивности ультразвукового излучения диагностического сканера при различных вариациях его настроек

В работе представлены исследования влияния частоты излучения, количества фокусов и фокусных позиций на уровень выходной интенсивности ультразвукового излучения линейного датчика диагностического сканера.

Ключевые слова: интенсивность ультразвукового излучения; равновесный газовый пузырек; диагностический сканер; В-режим; фокусная позиция; безопасность; информативность

Проводя ультразвуковое (УЗ) диагностическое исследование врач варьирует настройки сканера для достижения наиболее информативного изображения, при этом УЗ излучение может фокусироваться в какой-то одной области, либо быть равномерно распределено в пространстве. Все это может привести к локальному возрастанию интенсивности излучения. Для того чтобы этого избежать, необходимо понимать, как и в каком диапазоне изменяется интенсивность УЗ-излучения. Поэтому исследование изменения интенсивности УЗ-излучения при вариации настроек сканера является весьма актуальной задачей.

Чтобы избежать перегрева тканей, уровень выходной интенсивности УЗ-излучения, а также его распределение в пространстве ограничен международными стандартами (согласно IEC для В-режима – 100 мВт/см^2, согласно FDA для допплеровкого режима – 720 мВт/см^2) [1].

Для оценки интенсивности УЗ-излучения использовалось устройство (рис. 1), в основе которого лежит измерение радиусов равновесных пузырьков в жидкости в поле УЗ-датчика, равновесие которых достигается равенством выталкивающей силы F_V и силы радиационного давления F_R. Для создания газовых пузырьков в жидкости использу-

© Богдан О. П., Дудина Ю. С., Бабайлов Н. А., 2017

Работа выполнена по государственному заданию Министерства образования и науки РФ ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова» на 2014–2016 гг. в рамках проектной части проведения научно-исследовательских работ (проект № 3.751.2014/К).

ется формирователь пузырьков *3*, который образует стабильную кавитацию в емкости в дистиллированной воде *1*. При включении УЗ-датчика диагностического сканера в жидкости наблюдается суперпозиция полей УЗ-датчика *2* и формирователя пузырьков *3*, в пределах которых располагаются равновесные пузырьки. При выключении формирователя пузырьков в поле УЗ-датчика диагностического сканера в состоянии равновесия остаются пузырьки размером, соответствующим интенсивности УЗ-излучения, остальные всплывают. Полученное распределение равновесных пузырьков регистрируется *7* (рис. 2, *в*) и обрабатывается специализированным программным обеспечением *9* с целью оценки их радиуса и последующей оценки интенсивности УЗ-излучения, с использованием выражения [2]:

$$I_{SPTA} = \frac{\rho_0 C_0 g \left((kR)^6 + \left[\frac{3\mu^2}{\sigma} - (kR)^2 \right]^2 \right)}{3k^4 R^3}, \qquad (1)$$

где $\sigma = \rho_0/\rho$; k – волновое число; $\mu = C/C_0$; C – скорость звука в газовом пузырьке; C_0 – скорость звука в жидкости; g = 9,8 м/с^2 – ускорение свободного падения; R – радиус пузырька, ρ_0 – плотность жидкости; ρ – плотность газового пузырька.

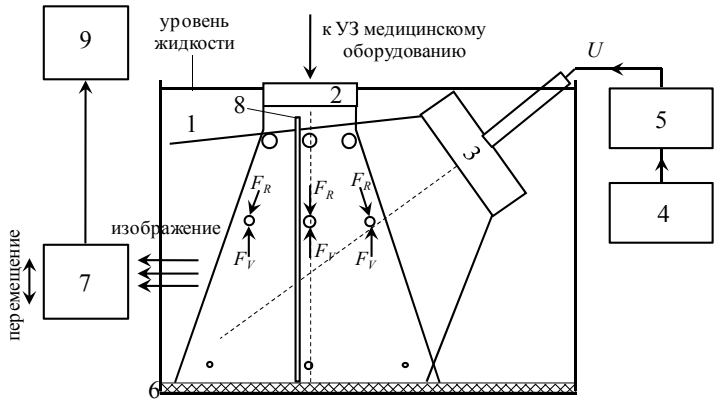


Рис. 1. Блок-схема устройства оценки интенсивности УЗ излучения: *1* – емкость с жидкостью; *2* – исследуемый УЗ-излучатель; *3* – формирователь пузырьков; *4* – генератор синусоидальных сигналов; *5* – регулируемый усилитель мощности; *6* – поглотитель; *7* – прибор для фотосъемки; *8* – линейка; *9* – персональный компьютер со специализированным программным обеспечением

Для создания газовых пузырьков в жидкости разработан и изготовлен пьезоэлектрический формирователь пузырьков (рис. 2, *а*), основным элементом которого является пьезопластина из сегнетожесткого материала ПКР-78 диаметром 25 мм, частота излучения 880 кГц. Пример газовых пузырьков, создаваемых с помощью формирователя, представлен на рис. 2, *б*.

а *б* *в*

Рис. 2. Схема формирователя пузырьков (*а*); газовые пузырьки, создаваемые формирователем пузырьков (*б*); равновесные газовые пузырьки в акустическом поле линейного датчика УЗ сканера Edan U50 (B-режим, f = 11 МГц, 4 фокуса, 7 фокусных позиций) (*в*): *1* – места пайки к медному корпусу; *2* – пьезопластина ПКР-78; *3* – силиконовый герметик; *4* – медная пластина; *5* – вывод «+»; *6* – вывод «–»

Проведены исследования влияния на выходную интенсивность УЗ линейного датчика диагностического сканера Edan U50 в B-режиме при изменении частоты УЗ-излучения 8 МГц и 11 МГц, числа фокусов – 1, 2, 3, 4 и фокусных позиций – 1, 7, 15. Результаты оценки интенсивности УЗ-излучения и соответствующих ей радиусов пузырьков представлены в табл. 1 и 2. Прочерком отмечены диапазоны по глубине, где равновесные пузырьки отсутствуют, следовательно, интенсивность излучения имеет очень малые значения, ниже чувствительности устройства.

Из табл. 1 и 2 видно, что изменение фокусных позиций и числа фокусов неоднозначно влияет на выходную интенсивность излучения, и сложно проследить какую-либо закономерность, к тому же наблюдаются изменения распределения интенсивности в пространстве.

Таблица 1. **Значение радиусов равновесных пузырьков при различных параметрах УЗ-сканера**

Глубина *h*, мм	Средний радиус равновесного пузырька *r*, мкм											
	Фокусные позиции											
	1				7				15			
	Число фокусов				Число фокусов				Число фокусов			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Частота УЗ-излучения *f* = 8 МГц												
0–10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
10–20	–	–	–	–	73	–	–	–	–	–	–	–
20–30	–	–	83	–	63	67	60	–	78	54	–	85
30–40	–	60	83	–	–	78	70	–	–	87	74	74
40–50	–	80	83	–	63	67	–	–	89	76	74	74
50–60	61	80	73	–	73	–	–	–	89	–	64	85
60–70	82	70	63	–	63	–	–	–	78	–	85	–
70–80	71	–	–	–	–	89	–	–	–	–	–	–
Частота УЗ-излучения *f* = 11 МГц												
0–0	–	74	85	–	–	63	64	76	–	–	–	64
10–20	–	85	74	70	–	–	85	87	–	–	–	85
20–30	–	85	74	80	–	–	64	76	–	–	–	–
30–40	–	74	85	70	–	–	64	65	85	–	–	–
40–50	–	64	85	–	–	78	–	65	85	–	–	74
50–60	–	85	–	–	–	–	64	65	64	–	–	53
60–70	–	64	–	–	–	–	85	65	85	–	–	–
70–80	–	64	64	–	–	–	64	–	64	–	–	–

Таблица 2. **Значение интенсивности УЗ-излучения при различных параметрах УЗ сканера**

Глубина *h*, мм	Интенсивность УЗ-излучения I, мВт/см2											
	Фокусные позиции											
	1				7				15			
	Число фокусов				Число фокусов				Число фокусов			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Частота УЗ-излучения *f* = 8 МГц												
0–10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
10–20	–	–	–	–	249	–	–	–	–	–	–	–
20–30	–	–	355	–	168	198	148	–	299	113	–	279
30–40	–	148	355	–	–	299	223	–	–	404	259	259
40–50	–	320	355	–	168	198	–	–	431	278	259	259
50–60	154	320	249	–	249	–	–	–	431	–	175	279
60–70	343	223	168	–	168	–	–	–	299	–	279	–
70–80	231	–	–	–	–	431	–	–	–	–	–	–

Окончание табл. 2

Глубина *h*, мм	Интенсивность УЗ-излучения I, мВт/см2											
	Фокусные позиции											
	1				7				15			
	Число фокусов				Число фокусов				Число фокусов			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Частота УЗ-излучения *f* = 11 МГц												
0–10	–	457	680	–	–	290	304	493	–	–	–	304
10–20	–	680	457	391	–	–	680	87	–	–	–	680
20–30	–	680	457	571	–	–	304	493	–	–	–	–
30–40	–	457	680	391	–	–	304	317	680	–	–	–
40–50	–	304	680	–	–	531	–	317	680	–	–	457
50–60	–	680	–	–	–	–	304	317	304	–	–	180
60–70	–	304	–	–	–	–	680	317	680	–	–	–
70–80	–	304	304	–	–	–	304	–	304	–	–	–

При некоторых комбинациях настроек наблюдается равномерное распределение интенсивности в пространстве (*f* = 11 МГц, 2 фокуса и 1 фокусная позиция), при других комбинациях настроек наоборот локальные максимумы интенсивности в пространстве (*f* = 8 МГц, 3 фокусов и 7 фокусных позиций), а в некоторых случаях вообще отсутствуют равновесные пузырьки (*f* = 8 МГц, 4 фокусов и 1 фокусной позиции). Увеличение частоты УЗ-излучения однозначно приводит к увеличению интенсивности излучения. Следует отменить превышение уровня интенсивности требований к В-режиму (100 мВт/см^2).

Таким образом, при изменении настроек сканера, таких как число фокусов и фокусные позиции, наблюдается изменение интенсивности УЗ-излучения и ее распределение в пространстве. Для обеспечения безопасности проведения УЗ-исследования необходимо четко понимать, какая из комбинаций настроек к чему приводит, поэтому данный вопрос требует дальнейшего более тщательного изучения.

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. Пат. № 140996. Устройство для определения параметров ультразвукового преобразователя / Муравьева О. В., Богдан О. П., Милич В. Н., Масленников С. И. – 27.05.2014.

Valuation of Ultrasonic Radiation Intensity for Diagnostic Scanner for Different Variations of Settings

The paper presents the study of the effect of the radiation frequency, the number of foci and focal point to the level of the output intensity of ultrasonic radiation linear diagnostic scanner sensor.

Keywords: intensity of ultrasonic radiation; equilibrium gas bubble; diagnostic scanner; B-mode; focus position; safety; information content

УДК 534.641

О. П. Богдан, кандидат технических наук, доцент
А. А. Климова, магистрант
В. В. Волков, магистрант
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Исследование влияния параметров измерительной установки на амплитудно-частотные и электрические характеристики пьезопластины, нагруженной на различные среды

Исследованы влияния параметров измерительной установки, таких как сопротивление развязки и размер пьезопластины, на амплитудно-частотные и электрические характеристики пьезопластины, нагруженной на различные среды, следовательно – на достоверность оценки акустического импеданса этих сред.

Ключевые слова: АЧХ; схема замещения; продольная пьезопластина; сдвиговая пьезопластина; вязкоупругая жидкость

Исследование акустических свойств различных сред позволяет оценивать их качество, что очень важно во многих областях промышленности и медицины. В настоящее время известен целый ряд физических методов, с помощью которых можно получать информацию об акустических свойствах средах, в том числе и биологических [1].

Одним из таких способов, позволяющих оценивать акустический импеданс, является анализ амплитудно-частотных и электрических характеристик пьезопластины, нагруженной на вязкоупругие среды. Электрическая схема измерительной установки, реализующей данный метод, представлена на рис. 1.

С генератора через сопротивление развязки R_p (R_{var} – изменяемое сопротивление развязки) подается напряжение на пьезопластину, нагруженную на вязкоупругую среду, и далее измеряется с использование осциллографа. В измерительной установке предусмотрен ключ, позволяющий устанавливать сопротивление развязки либо постоянное R_p = 200 Ом, либо любое R_{var}, которое необходимо для измерений. Далее, измерив АЧХ и определив значения частоты резонанса f_r и антире-

© Богдан О. П., Климова А. А., Волков В. В., 2017
Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №15-19-00051).

зонанса f_a и соответствующие им напряжения U_r, U_a, представив пьезопластину в виде последовательно подключенных активного сопротивления R, емкости C и индуктивности L [1, 2], можно определить акустический импеданс Z среды, в которой находится пьезопластина, используя выражение:

$$Z = \frac{U_{R_I}^2 U_{C0}^2 Z_0 f_{r0}^2 R_{I0}}{U_{R0_I}^2 U_C^2 f_r^2 R_I}, \qquad (1)$$

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. Электрическая схема замещения пьезопластины подробно рассмотрена в [1].

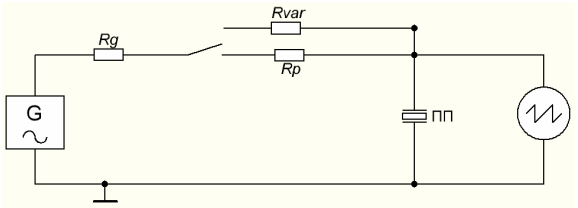
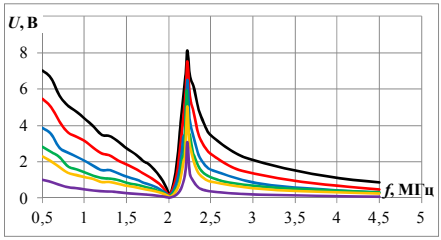


Рис. 1. Электрическая схема измерительной установки

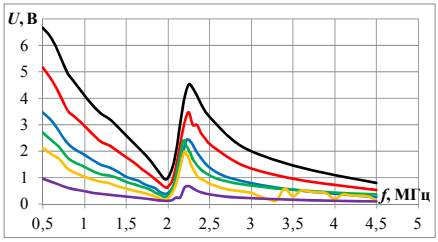
С использованием данной установки выполнено исследование влияния номинала резистора развязки на результаты измерения АЧХ, электрические параметры схемы замещения пьезопластины и акустического сопротивления среды. Исследования проводились в трех средах (воздух, вода, глицерин) с продольной пьезопластиной размером 20×20×1, емкость C_1 = 4,7 нФ, напряжение генератора U_g = 10 В, номиналы резистора развязки 51 Ом, 100 Ом, 200 Ом, 300 Ом, 390 Ом, 1000 Ом.

С увеличением номинала резистора развязки (рис. 2) наблюдается уменьшение всех характеристик АЧХ частоты резонанса f_r и антирезонанса f_a и соответствующие им напряжения U_r, U_a, особенно ярко это выражено для глицерина в виду его большей плотности. В тоже время это приводит к росту активного сопротивления R (табл. 1) пьезопла-

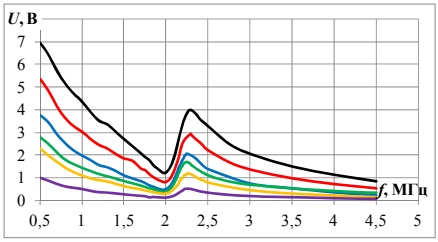
стины. Емкость C и индуктивность L пьезопластины практически не изменяются, т. к. сопротивление развязки влияет только на напряжения U_r, U_a в области резонанса и антирезонанса, оставляя неизменными их частоты. Следовательно, при исследовании плотных и вязких материалов стоит избегать высоких значений сопротивления развязки, т. к. резонанс и антирезонанс становятся менее выраженными, что может привести к ошибке при оценке акустического импеданса среды. Наиболее равномерные АЧХ, без всяких всплесков, получены для сопротивлений развязки 51 Ом, 200 Ом и 300 Ом для всех трех сред.



воздух



вода



глицерин

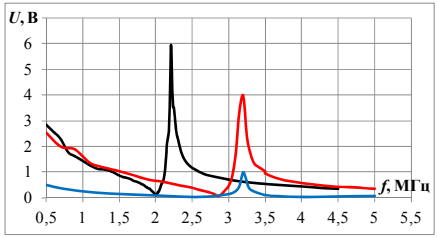
Рис. 2. АЧХ продольной пьезопластины, нагруженной на различные среды при различных сопротивлениях развязки Rp: 51 Ом, 100 Ом, 200 Ом, 300 Ом, 390 Ом, 1000 Ом

Таблица 1. **Параметры эквивалентной схемы замещения при различных значениях сопротивления развязки**

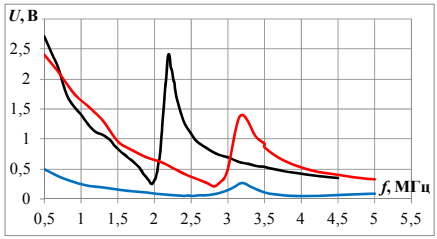
R_p, Ом	f_r, МГц	f_a, МГц	U_r, В	U_a, В	R, Ом	C, нФ	L, мкГн
Воздух							
51	1,95	2,22	0,77	8,1	1,15	1,19	5,28
100	1,95	2,22	0,448	7,5	1,52	1,25	5,05
200	2,01	2,22	0,104	6,48	2,06	1,25	5,05
300	2,01	2,21	0,095	5,9	1,90	1,12	5,58
390	2,02	2,22	0,054	5,04	3,14	1,12	5,53
1000	2,01	2,22	0,03	3,06	3,01	1,19	5,28
Вода							
51	1,98	2,25	0,915	4,5	5,14	1,57	4,11
100	1,99	2,25	0,6	3,46	6,38	1,5	4,25
200	1,98	2,23	0,376	2,44	7,81	1,45	4,46
300	1,97	2,2	0,246	2,4	10,01	1,52	4,26
390	1,96	2,2	0,156	2,0	6,18	1,4	4,69
1000	1,98	2,25	0,106	0,665	10,71	1,27	5,10
Глицерин							
51	1,98	2,29	1,21	4,0	7,02	1,82	3,54
100	1,98	2,29	0,82	2,94	8,93	1,83	3,54
200	1,97	2,24	0,468	2,06	9,86	1,65	3,98
300	1,97	2,24	0,376	1,7	13,52	1,79	3,61
390	1,98	2,26	0,296	1,19	11,89	1,63	3,95
1000	1,99	2,23	0,139	0,53	14,09	1,38	4,63

Аналогичные исследования выполнены для продольных пьезопластин разных размеров 20×20×1 мм, 20×9×0,7 мм, 70×15×0,65 мм в средах *воздух*, *вода*, *глицерин* при сопротивлении развязки $R_р$ = 300 Ом.

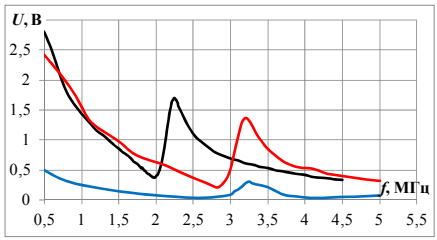
С уменьшением толщины пьезопластины (рис. 3) наблюдается смещение резонанса и антирезонанса в сторону более высоких частот, при этом наблюдается уменьшение напряжении U_r, U_a, во всех средах, к тому же с увеличением плотности среды резонанс становится менее выраженным, что приводит к сложности его определения. Данный эффект может также наблюдаться в результате больших размеров пьезопластины, что может увеличить внутренние потери при излучении. Так, для пьезопластины 70×15×0,65 мм резонанс практически не выражен даже в воздухе. Следовательно, при измерении импеданса нельзя использовать очень тонкие и большие пьезопластины, при этом использование очень маленьких пьезопластин может привести к возникновению дополнительных резонансов, и АЧХ будет искажена, что тоже скажется на достоверности оценки.



воздух



вода



глицерин

Рис. 2. АЧХ продольных пьезопластин нагруженных на различные среды:
20×20×1, 20×9×0,7, 70×15×0,65

Изменение размера пьезопластины приводит и к изменению параметров электрической схемы замещения (табл. 2). Увеличение размера и уменьшение толщины пьезопластины ведет у уменьшению активного сопротивления R и индуктивности L и, наоборот, приводит к увеличению емкости C.

По полученным данным и с помощью формулы (1) определено значение акустического импеданса глицерина (табл. 3) табличное значение которого составляет 2,42 10^6 Па·с/м. Из табл. 3 видно, что наиболее близкое значение акустического импеданса к табличному имеет пьезопластина 20×20×1, номинал сопротивления развязки 200 Ом,

300 Ом и 1000 Ом, но последний имеет плохо выраженный резонанс на графике АЧХ.

Таблица 2. **Влияние размеров пьезопластины на параметры эквивалентной схемы замещения**

Размер пьезопластины	f_r, МГц	f_a, МГц	U_r, В	U_a, В	R, Ом	C, нФ	L, мкГн
Воздух							
20×20×1	2,01	2,21	0,095	5,9	1,90	1,12	5,58
20×9×0,7	2,85	3,2	0,051	3,96	1,54	1,07	2,92
70×15×0,65	2,55	3,2	0,0235	0,98	0,71	13,4	0,29
Вода							
20×20×1	1,97	2,2	0,246	2,4	10,01	1,52	4,26
20×9×0,7	2,8	3,2	0,212	1,4	6,5	1,26	2,57
70×15×0,65	2,5	3,2	0,043	2,6	1,27	18,1	0,24
Глицерин							
20×20×1	1,97	2,24	0,376	1,7	13,52	1,79	3,61
20×9×0,7	2,8	3,2	0,216	1,37	6,63	1,26	2,57
70×15×0,65	2,55	3,25	0,0375	0,308	1,13	14,5	0,27

Таблица 3. **Акустический продольный импеданс глицерина**

Размер пьезопластины	Акустический импеданс Z, 10^6 Па·с/м					
	сопротивление развязки R_p, Ом					
	51	100	200	300	390	1000
20×20×1	3,01	3,23	2,81	2,98	5,82	2,58
20×9×0,7	–	–	–	1,29	–	–
70×15×0,65	–	–	–	5,9	–	–

Таким образом, исследования показали, что и номинал сопротивления развязки и размеры пьезопластины влияют на АЧХ пьезопластины и достоверность оценки акустического импеданса. Сопротивления развязки следует выбирать 200 или 300 Ом, для сильно плотных сред, возможно, остановиться на выборе 51 Ом, остальные значения имеют невыраженный резонанс либо несколько минимумов и максимумов на графике АЧХ, что увеличивает погрешность измерения. При выборе пьезопластины следует избегать очень больших и малых размеров, это также приводит к сложности измерения резонанса, и как следствие, – к недостоверным результатам измерения акустического импеданса.

Список литературы

1. 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 Всерос. науч.-техн. конф. асп., магистр. и молодых ученых с междунар. участием (Ижевск, 20–21 апр. 2016 г.). – Электрон. дан. (1 файл : 33 Mb.). – Ижевск : ИННОВА, 2016. – 1044 с. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 344–349.

2. *Буденков, Г. А.* Физические основы и методы акустического контроля : метод. указания по выполнению лабораторных работ для студентов спец. 19.02 / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 1997. – 48 с.

Research of Influence of the Measuring Installation Parameters on Amplitude-Frequency Response and Electrical Characteristics of Piezoelectric Plates Loaded on Different Environments

The work investigated the influence of parameters of the measuring installation, such as the isolation resistance and size of piezoelectric plates on the amplitude and frequency, and the electrical characteristics of piezoelectric plates loaded with different media, and therefore the reliability assessment of the acoustic impedance of the environments.

Keywords: frequency response function; equivalent circuit; the longitudinal piezoelectric plates; the shear piezoceramic plates; viscoelastic fluid

УДК 534.641

О. П. Богдан, кандидат технических наук, доцент
М. А. Подсизерцева, студент
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Исследование акустических свойств машинного масла различных марок

Представлены исследования акустических свойств машинного масла различных марок, в том числе до переработки и после, с использованием установки для измерения АЧХ пьезопластины, нагруженной на эти масла и расчетом электрических параметров эквивалентной схемы замещения пьезопластины.

Ключевые слова: акустический импеданс; машинное масло; контроль качества; пьезопластина; эквивалентная электрическая схема

На рынке существует большое количество различных марок машинного масла, являющихся одним из основных факторов, определяющих надежность и эффективность работы двигателей при эксплуатации. Качество машинного масла и его применение в различных областях зависит от его свойств, таких как вязкость, температура вспышки, плотность и др. К тому же свойства, следовательно, и качество масла, меняются в процессе эксплуатации двигателей. К моторным маслам предъявляют высокие требования, которые регламентируются ГОСТ [1, 2].

Существуют различные способы оценки плотности и вязкости машинного масла, в том числе и стандартизированные, но кроме них данные характеристики возможно определить по акустическим свойствам масла, в частности по акустическому импедансу. В работе представлено исследование акустического импеданса различных марок машинного масла, оценка которого основана на анализе амплитудно-частотных и электрических параметров эквивалентной схемы замещения пьезопластины, погруженной в машинное масло.

На рис. 1 показана блок-схема установки для измерения акустического импеданса.

© Богдан О. П., Подсизерцева М. А., 2017
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00051).

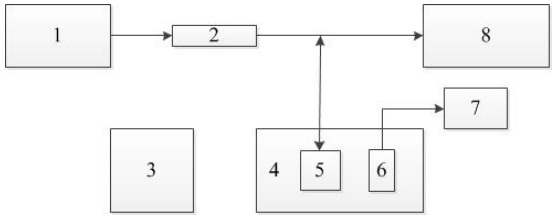


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения акустического импеданса: *1* – генератор; *2* – сопротивление развязки Rp; *3* – емкость с эталонной жидкостью; *4* – емкость с исследуемой жидкостью; *5* – пьезопластина; 6 – датчик температуры; *7* – пирометр; *8* – осциллограф

На пьезопластину *5*, нагруженную последовательно на воздух (для устранения внутренних потерь в пьезопластине), воду или эпоксидную смолу *3* (используемые 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* получаем амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) пьезопластины, нагруженной на различные среды, из которых определяется минимальное U_r и максимальное U_a значения напряжения, снимаемого с пьезопластины и соответствующие им значения резонансной f_r и антирезонансной f_a частот [3]. Включение в измерительную установку датчика температуры *6* и пирометра *7* позволяет контролировать температуру среды в процессе измерения.

Колеблющуюся пьезопластину можно заменить эквивалентной электрической схемой (рис. 2), состоящей из электрической емкости C_1, соединенной параллельно с цепочкой последовательно соединенных индуктивности L, емкости C и активного сопротивления R, значения которых определяется по формулам [4]:

$$L = \frac{1}{f_r^2 C 4\pi^2}, \tag{1}$$

$$C = C_1 \left[\left(\frac{f_a}{f_r} \right)^2 - 1 \right], \tag{2}$$

$$R = \frac{R_p}{\frac{U_g}{U_r} - 1}, \tag{3}$$

где R_p – сопротивление развязки; U_g – напряжение, подаваемое с генератора.

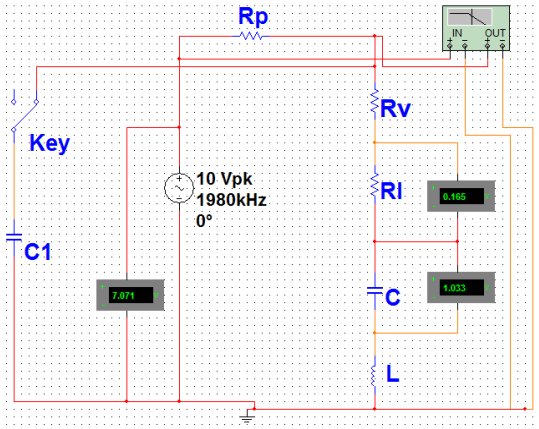


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема пьезопластины в программной среде *Multisim*

Собрав эквивалентную электрическую схему замещения пьезопластины, нагруженной на среду, с помощью программы *Multisim* можно измерить напряжение U_{RI} на резисторе R_I и напряжение U_C на конденсаторе C, как показано на рис. 2. Используя полученные с помощью измерительной установки и эквивалентной электрической схемы замещения пьезопластины данные, акустический импеданс исследуемой среды Z вычисляется по формуле

$$Z = \frac{U_{R_I}^2 U_{C0}^2 Z_0 f_{r0}^2 R_{I0}}{U_{R0_I}^2 U_C^2 f_r^2 R_I}, \qquad (4)$$

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.

Получены экспериментальные результаты исследования АЧХ и электрических параметров пьезопластины и акустического импеданса моторного масла Лукойл 10W40 п/синт., трансмиссионного масла ТАД-17, моторного масла Shell Helix hx7 5W40 п/синт., смазки Литол-24, при подаче на пьезопластину с генератора U_g = 10 В, с использованием продольной пьезопластины (20×20×1 мм, C_1 = 4,7 нФ), сопротивление развязки 250 Ом.

На рис. 3 представлены АЧХ продольной пьезопластины, нагруженной на исследуемые масла, а также на воздух и воду.

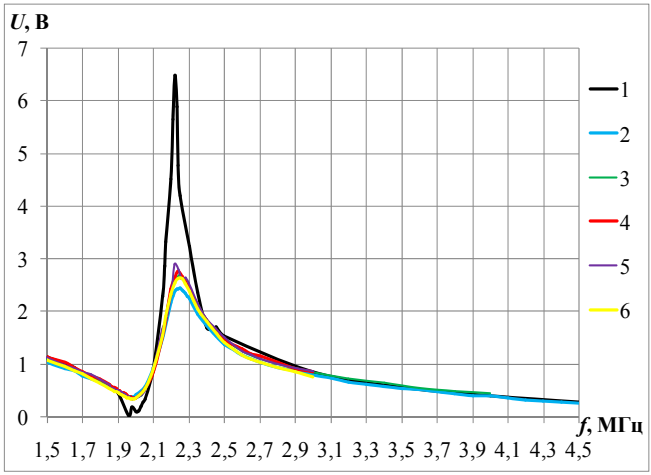


Рис. 3. АЧХ продольной пьезопластины, нагруженной на среды: *1* – воздух; *2* – вода; *3* – моторное масло Лукойл 10W40 п/синт.; *4* – трансмиссионное масло ТАД-17; *5* – моторное масло Shell Helix hx7 5W40 п/синт.; *6* – смазка Литол-24

Из графиков видно, что для воздуха, по сравнению с остальными средами, величина напряжения в резонансе f_r = 1,96 МГц имеет минимальное значение U_r = 25,5 мВ, в антирезонансе f_a = 2,22 МГц – максимальное U_a = 6,48В. Для воды наблюдается обратная картина: величина напряжения в резонансе f_r = 1,98 МГц имеет максимальное значение U_r = 0,38 В, в антирезонансе f_a = 2,25 МГц – минимальное U_a = 2,44 В. АЧХ продольной пьезопластины, нагруженной на исследуемые масла, занимают среднее значение (табл. 1), т. к. они имеют плотность меньшую, чем вода. Согласно справочным данным, моторное масло в среднем имеет скорость звука C_l = 1740 м/с, плотность ρ = 870 кг/м^3, акустический импеданс Z = 1,51·10^6 Па·с/м.

Таблица 1. **Параметры эквивалентной схемы замещения и акустические свойства различных масел**

Среда	f_r, МГц	f_a, МГц	U_r, В	U_a, В	L, мкГн	R, Ом	C, нФ	Z, МПа·с/м
Моторное масло Лукойл 10W40 п/синт.	1,99	2,25	0,35	2,70	4,26	9,12	1,50	1,27
Трансмиссионное масло ТАД-17	1,99	2,24	0,36	2,76	4,44	9,23	1,44	1,19
Смазка Литол-24	1,97	2,24	0,34	2,62	4,04	8,91	1,61	1,42
Моторное масло Shell Helix hx7 5W40 п/синт.	1,98	2,22	0,33	2,90	4,65	8,40	1,39	0,99

Используя формулы (1)–(3), определим параметры электрической схемы замещения пьезопластины, нагруженной на исследуемые масла, значения которых приведены в табл. 1. Подставив эти значения в схему, смоделированную в программной среде *Multisim*, измерим напряжение U_{RI} на резисторе R_I и напряжение U_C на конденсаторе C, с помощью формулы (4) вычислим продольный акустической импеданс для каждого машинного масла (табл. 1).

Аналогичные исследования выполнены для моторного масла Shell Helix п/синт, непереработанного и после переработки (рис. 4, табл. 2). После переработки масла наблюдается небольшое смещение всех значений АЧХ, схемы замещения и акустического импеданса.

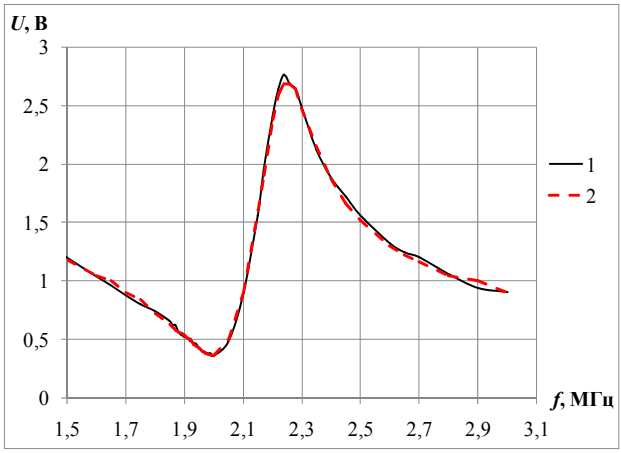


Рис. 4. АЧХ продольной пьезопластины, нагруженной на моторное масло Shell Helix п/синт: *1* – непереработанное; *2* – переработанное

Таблица 2. **Параметры эквивалентной схемы замещения и акустические свойства моторного масла Shell Helix 5W40 п/синт.**

Среда	f_r, МГц	f_a, МГц	U_r, В	U_a, В	L, мкГн	R, Ом	C, нФ	Z, МПа·с/м
непереработанное	2,00	2,24	0,36	2,76	4,61	9,34	1,37	1,09
переработанное	1,99	2,24	0,36	2,68	4,33	9,34	1,47	1,25

Таким образом, в работе показана возможность оценки акустического импеданса различных масел технического назначения с использованием электрических параметров схемы замещения пьезопластины, нагруженной на них, по величине которого можно судить о качестве масла, либо о степени его переработки и, следовательно, о возможности использования.

Список литературы

1. ГОСТ 10541–78. Масла моторные универсальные и для автомобильных карбюраторных двигателей. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2011. – 11 с.

2. ГОСТ Р 51634–2000 Масла моторные автотракторные. Общие технические требования. – М. : Стандартинформ, 2000. – 4 с.

3. 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 Всерос. науч. техн конф. асп., магистр. и молодых ученых с междунар. участием (Ижевск, 20–21 апр. 2016 г.). – Электрон. дан. (1 файл : 33 Mb.). – Ижевск : ИННОВА, 2016. – 1044 с. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 344–349.

4. *Буденков, Г. А*. Физические основы и методы акустического контроля : метод. указания по выполнению лабораторных работ для студентов спец. 19.02 / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 1997. – 48 с.

The Research of Acoustic Properties of Engine Oil of Different Brands

The researches of engine oil properties of different brands are presented in this article, which includes base and waste oil. The study used the installation for measurement of piezoelectric-crystal plate AFC, which are immersed in the oils and calculation electric parameters of equivalent circuit of substitution of piezoelectric-crystal plate.

Keywords: acoustic impedance; engine oil; quality control; piezoelectric-crystal plate; equivalent electrical circuit

УДК 620.179.16

И. В. Булдакова, аспирант
Л. В. Волкова, кандидат технических наук, доцент
А. Ю. Будрин, магистрант
С. В. Казанцев, студент
М. А. Понькин, студент
E-mail: pmkk@istu.ru
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), СибГИУ (г. Новокузнецк)
М. А. Синцов, зав. лабораторией «Физические методы контроля»
Инжиниринговый центр «ИжСпецТех»

Чувствительность разных типов волн при ультразвуковой структуроскопии сварных швов рельсов

Представлены результаты экспериментальных измерений скорости объемных, рэлеевских и головных волн в задачах определения напряжений и структурных изменений в сварном шве рельсов. Определен тип волн, обладающий наибольшей структурной чувствительностью.

Ключевые слова: ультразвук; поперечная волна; головная волна; рэлеевская волна; сварной стык рельсов

В настоящее время бесстыковой путь является основной конструкцией железнодорожного пути в России. При создании такого пути рельсы сваривают электроконтактным или алюминотермитным способами. При сварке сталей в результате высокотемпературного градиентного нагрева и структурных превращений в сварном шве и зоне термического влияния возникают значительные остаточные растягивающие напряжения, определяющие долговечность и надежность сварных конструкций. Такое напряженное состояние металла шва и околошовной зоны является нежелательным, т. к. способствует хрупкому разрушению материала. Помимо растягивающих напряжений, в результате сварки возникают также сжимающие напряжения и изменение структуры материала. Эти изменения имеют разный характер по объему объекта и зависят от металла и технологии сварки. Для предотвращения и отслеживания этих явлений необходимо оценивать остаточные напряжения в рельсах.

© Булдакова И. В., Волкова Л. В., Будрин А. Ю., Казанцев С. В., Понькин М. А., Синцов М. А., 2017

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-12-00010).

В свою очередь, точные измерения скорости ультразвука позволяют определять изменения структуры и характер распределений внутренних напряжений. Однако зачастую выявить зависимости значения скорости ультразвуковой волны в материале от определеных параметров структуры или уровня напряжений в объекте затруднительно. По этой причине экспериментально устанавливаются взаимосвязи между скоростью ультразвуковых волн и исследуемым параметром.

В данной статье рассмотрена информативность разных типов ультразвуковых волн как структурночувствительного фактора при исследованиях области сварных швов рельсов.

Ультразвуковыми методами на основе поперечных, рэлеевских и головных волн были измерены скорости волн в области сварных соединений, выполненных электроконтактной сваркой в четырех отрезках рельсов типа Р65.

В качестве измерительных средств использовались акустические структуроскопы СЭМА [1], ИСАВ [2] и ультразвуковой дефектоскоп «Уралец» УД9812. Применялись электромагнитно-акустический преобразователь, возбуждающий и принимающий две сдвиговые волны с взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации [3], и раздельно-совмещенные пьезопреобразователи рэлеевских волн и головных волн [2].

Измерения проводились на поверхности катания рельса в точках, расположенных друг от друга на расстоянии 40 мм, и на расстоянии 10 мм в зоне термического влияния сварного соединения. Серия измерений повторялась 5 раз.

Использование бесконтактного электромагнитно-акустического преобразователя (ЭМА), входящего в структуроскоп СЭМА, позволяет получить две поперечные волны, поляризованные перпендикулярно и вдоль оси рельса и распространяющиеся между головкой рельса и его подошвой (рис. 1). На ПК в специализированном программном обеспечении *Sensitive* фиксируется время прихода двух поперечных волн. В этом случае скорость ультразвуковой волны C_t определяется по формуле

$$C_t = \frac{2h}{t_t}, \qquad (1)$$

где h – высота рельса; t_t – время распространения волны между головкой рельса и его подошвой.

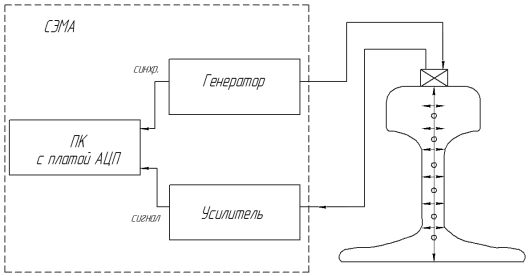


Рис. 1. Схема измерения поперечных волн структуроскопом СЭМА

Структуроскоп ИСАВ-1 фиксирует время прихода рэлеевской волны (рис. 2). В этом случае скорость поверхностной волны C_R вычисляется по формуле

$$C_R = \frac{l_{\text{ПЭП}}}{\left(t_R - t_{\text{пр}}\right)}, \tag{2}$$

где $l_{\text{ПЭП}}$ – база преобразователя; t_R – время прихода поверхностной волны; $t_{\text{пр}}$ – время задержки волны в призме преобразователя.

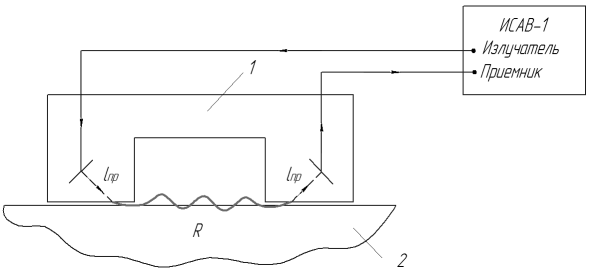


Рис. 2. Схема измерения рэлеевских волн: *1* – раздельно-совмещенный пьезоэлектрический преобразователь; *2* – поверхность катания рельса; $l_{\text{пр}}$ – продольная волна в преобразователе; R – рэлеевская волна

Схема измерения скоростей головных волн представлена на рис. 3. При установке преобразователя на поверхность катания рельса на дисплее ультразвукового дефектоскопа «Уралец» УД9812 отображается дефектограмма.

Для учета времени задержки волны в призме преобразователя использовался стандартный образец СО2. Учитывая, что скорость головной волны равна скорости продольной волны ($C_{\text{СО2}}$ = 5900 м/с) [5]

и зная базу преобразователя $l_{ПЭП}$ = 72,4 мм, можно вычислить время распространения головной волны t_{CO2} в стандартном образце. Для вычисления временной задержки Δt между временем распространения головной волны в образце СО2 и рельсе сравнивались результаты измерений для стандартного образца и образцов рельсов. При этом скорость головной волны $C_Г$ вычисляется по формуле:

$$C_Г = \frac{l_{ПЭП}}{t_{CO2} + \Delta t}. \quad (3)$$

Средние значения скоростей измеренных ультразвуковых волн приведены в табл. 1.

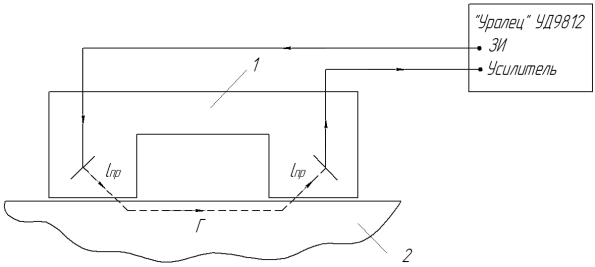


Рис. 3. Схема измерения головных волн: *1* – раздельно-совмещенный пьезоэлектрический преобразователь; *2* – поверхность катания рельса; $l_{пр}$ – продольная волна в преобразователе; Г – головная волна

Таблица 1. **Усредненные результаты измерения скорости для исследуемых образцов рельсов**

№ рельса	Тип ультразвуковой волны	$\overline{C}$, м/с	Случайная погрешность ΔC	
			м/с	%
1	Поперечная волна *Ct*	3200	2	0,05
	Рэлеевская волн *Cr*	2831	4	0,14
	Головная волна $C_Г$	5894	4	0,06
2	Поперечная волна *Ct*	3215	2	0,05
	Рэлеевская волн *Cr*	2847	4	0,14
	Головная волна $C_Г$	5908	5	0,09
3	Поперечная волна *Ct*	3235	2	0,06
	Рэлеевская волн *Cr*	2841	3	0,1
	Головная волна $C_Г$	5927	7	0,12
4	Поперечная волна *Ct*	3243	2	0,06
	Рэлеевская волн *Cr*	2846	2	0,06
	Головная волна $C_Г$	5926	8	0,13

Анализ полученных результатов показывает, что метод измерения скорости поперечной волны в рельсе имеет минимальную случайную погрешность среди рассмотренных, т. е. является наиболее устойчивым к нестационарным помехам и состоянию поверхности объекта контроля.

Зависимости отношения измеренных скоростей по длине исследуемых рельсов для объемной, головной и рэлеевской волн приведены на рис. 4.

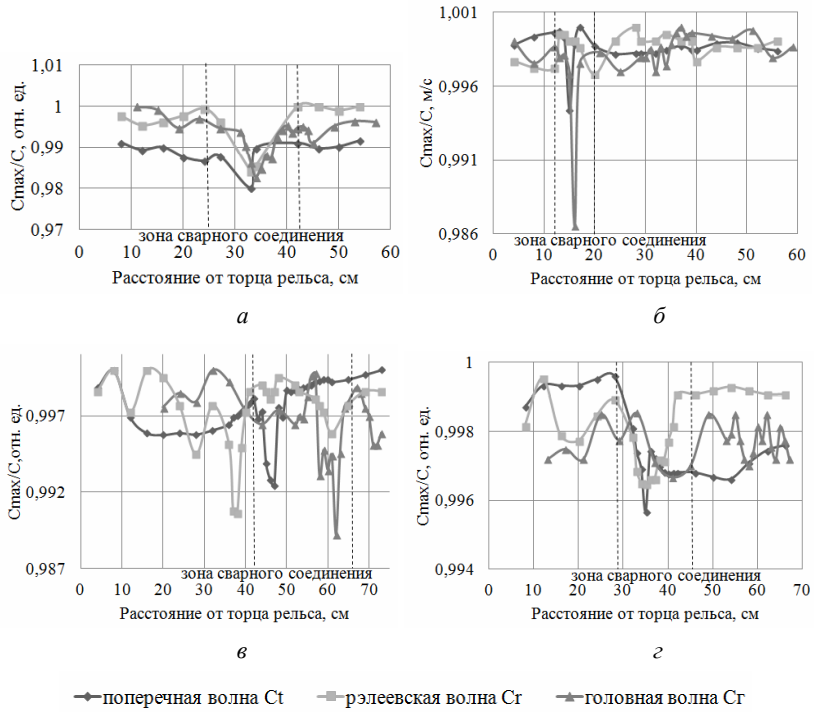


Рис. 4. Распределение нормированных значений скоростей в рельсе № 1 (*а*); рельсе № 2 (*б*); рельсе № 3 (*в*); рельсе № 4 (*г*)

Значения нормировались по максимальному значению скорости для каждого типа волны. Характер изменения кривых показывает, что сварное соединение является концентратором напряжения. Наблюдается увеличение скорости ультразвуковой волны на границах сварного соединения, что связано со структурным состоянием и ростом сжимающих напряжений в данной зоне, а также резкое уменьшение значе-

ний в центре сварного шва в связи со значительными растягивающими напряжениями в этой области.

Для определения структурной чувствительности сравнивались кривые для поперечной, рэлеевской и головной волн в зоне сварного соединения. Кривые структурной чувствительности в зоне сварного соединения рельса № 2 приведены на рис. 5.

Рис. 5. Кривые структурной чувствительности для поперечной, рэлеевской и головной волн в сварном соединении рельса № 2 (*1* – рэлеевская волна; *2* – поперечная волна; *3* – головная волна)

Полученные результаты показывают, что структурная чувствительность для головных волн выше, чем для объемных, и существенно больше, чем для рэлеевских волн. При оценке результатов измерения наблюдается крутая зависимость скорости распространения головных волн по длине сварного соединения, тогда как скорость рэлеевской волны оставалась практически неизменной.

Таким образом, установлено, что на границах сварного соединения сконцентрировано резкое изменение структуры от литого состояния к прокатному, а в центре сварного соединения – литая структура. Анализ поведения кривых полученных значений скоростей по длине рельса позволяет выявить места с наибольшим изменением структуры. Результаты определения скорости волн показывают, что наибольшей чувствительностью к изменениям структуры обладает головная волна.

Список литературы

1. *Буденков, Г. А.* Исследование напряженно-деформированного состояния ободьев цельнокатаных вагонных колес методом акустической тензометрии / Г. А. Буденков, В. В. Муравьев, О. В. Коробейникова // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2009. – Т. 6. – № 3. – С. 111–117.

2. 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.

3. *Муравьев*, *В. В.* Оценка величины натяга бандажей локомотивных колес методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова // Дефектоскопия. – 2013. – № 9. – С. 40–46.

4. *Алешин*, *Н. П.* О возможности использования головных волн для контроля механических напряжений / Н. П. Алешин, М. А. Прилуцкий, А. Л. Углов // Сварка и диагностика. – 2008. – № 3. – С. 17–19.

5. *Ермолов*, *И. Н.* Неразрушающий контроль : справ. : в 7 т. – Т. 3. Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге ; под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2004. – 835 с.

6. 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.

7. *Budenkov*, *G. A.* On calculation of the piezoelectric transducers of Rayleigh waves / G. A. Budenkov, O. V. Nedzvetskaya // Дефектоскопия. – 1992. – № 10. – С. 76–81.

8. Study of the acoustic fields of Rayleigh waves generated by growing cracks / G. A. Budenkov, O. V. Nedzvetskaya, A. Yu. Kotolomov, A. V. Bakhtin // Russian Journal of Nondestructive Testing. 1998. – Vol. 34. – No. 5. – Pp. 357–367.

9. *Муравьева*, *О. В.* Моделирование акустических полей синфазных электромагнитно-акустических преобразователей / О. В. Муравьева, А. В. Мышкин // Дефектоскопия. – 2013. – № 12. – С. 69–76.

10. 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.

11. *Муравьева*, *О. В.* Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневого электромагнитно-акустического метода контроля прутков / О. В. Муравьева, М. Ю. Соков // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2016. – № 3(71). – С. 46–50.

The Sensitivity of Different Types of Ultrasonic Waves in Structural Analysis of Welded Joints of Rails

The paper presents the results of experimental measurements of the velocity of body wave, Rayleigh wave and lateral wave for determination stress and structural changes in the welded rails. Method with the greatest acoustoelasticity effect was detect.

Keywords: ultrasound; shear wave; lateral wave; Rayleigh wave; welding joint of rails

УДК 615.47:616.072.7

Л. В. Волкова, кандидат технических наук, доцент
Д. В. Злобин, кандидат технических наук, доцент
E-mail: ludmila396@rambler.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
А. П. Белых, магистрант
Красноярский филиал Санкт-Петербургского университета гражданской авиации

Поиск информативных параметров сигналов электронной аускультации

Рассматриваются информативные параметры сигнала, полученные с электронного фонендоскопа. Для исследования параметров сигнала использован программный продукт WinПОС. Исследованию подлежали основная частота спектра, математическое ожидание, дисперсия, среднеквадратичное отклонение сигнала. Проведена сравнительная характеристика указанных параметров у здоровых и больных пациентов.

Ключевые слова: электронный фонендоскоп; аускультация; частота спектра; математическое ожидание; дисперсия; плотность вероятности

Введение

Аускультация легких и сердца имеет важное значение в диагностике болезней бронхолегочной и сердечно-сосудистой систем. Аускультация представляет собой получение механических колебаний от поверхности тела, которые охватывают диапазон звуковых частот [1]. При аускультации выслушивают звуки, возникающие в организме человека в процессе работы основных систем жизнедеятельности – сердечно-сосудистой, респираторной и желудочно-кишечного тракта. Аускультация является одним из наиболее известных и широко применяемых пассивных методов диагностики состояния организма, ценность которого обусловлена простотой процедуры при большом объеме информации, получаемой врачом, а также экономической эффективностью при выборе дополнительного обследования [2]. Эволюция стетоскопа представляет собой последовательные этапы совершенствования конструкции прибора.

Поиск технических средств аускультации привел к созданию первичных преобразователей – датчиков, регистрирующих звуки жизне-

© Волкова Л. В., Злобин Д. В., Белых А. П., 2017
Работа выполнена в рамках проекта № 3.751.2014 / К по госзаданию Минобрнауки РФ.

деятельности. При работе с фонендоскопом датчики необходимы для съема звука с поверхности тела и передачи его на слуховые органы врача [3].

Различные исследования показали, что результаты аускультации могут быть интерпретированы по-разному, с высокой долей субъективной составляющей при постановке диагноза.

Это обусловлено, в частности, определенными ограничениями человеческого слухового аппарата, включающими в себя нечувствительность к низким частотам, пониженную реакцию на быстро возникающие, короткие звуковые события, а также маскировку громкими звуками, возникающими одновременно с тихими [4].

Целью работы являлось выявление информативных параметров электронной аускультации.

Электронный фонендоскоп

Для исследования был выбран электронный фонендоскоп (рис. 1) [5], в котором в качестве датчика для прослушивания легких пациентов выступает акустический сенсор на основе биморфного пьезоэлектрического элемента, обладающий повышенной помехозащищенностью от посторонних шумов.

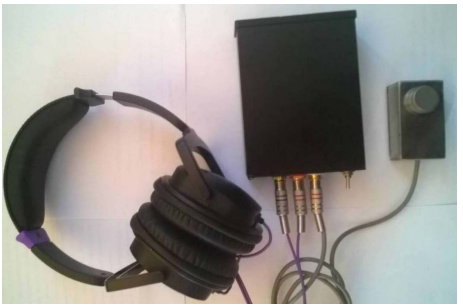


Рис. 1. Электронный фонендоскоп

Разработанный фонендоскоп работает следующим образом. После включения элемента питания выключателем и подключения головных телефонов врач прикасается контактной площадкой к участку тела пациента, подлежащего аускультации.

Звуковые колебания трансформируются биморфным преобразователем, использование в котором демпфирующего слоя предотвращает нежелательные резонансы, в электрические сигналы, поступающие на плату усилителя. Контактные шумы, способные вызвать помехи ау-

скультации, поглощаются звукоизолирующей прокладкой, необходимый уровень чувствительности выставляется регулятором громкости, а корпус, выполненный из ферромагнитного материала, обеспечивает изоляцию от внешних электрических помех.

Подключение к фонедоскопу звукозаписывающего устройства позволяет записывать сигналы для долгосрочного хранения и анализа в специализированных программных продуктах.

Методика аускультации

Для исследования пациентов применялась следующая методика измерения:

1. Положение больного при аускультации проводится в положении больного стоя.

2. Выслушивание должно проводиться в различные фазы дыхания в течение 15 секунд

3. Выслушивание легких производится в точках верхней доли правого легкого и верхней доли легкого.

4. Сигнал поступает на компьютер и записывается в файл формата wav.

5. В специальном программном обеспечении сигнал обрабатывается:

5.1. Удаляются шумы при установке датчика на тело пациента.

5.2. Сигнал нормализуется по максимальной амплитуде.

6. Последующая обработка сигнала по выявлению информативных параметров производится в программном обеспечении WinПОС.

Для обработки сигналов были сняты сигналы дыхания с 4 здоровых взрослых и 2 здоровых детей, а также больных пациентов с различными диагнозами, представленными в табл. 1.

Таблица 1. **Диагнозы пациентов**

Пациенты	Диагноз
Пациент 1	Пневмония обоих легких на стадии 2
Пациент 2	Пневмония правого легкого на стадии 3
Пациент 3	Пневмония правого легкого на стадии 3
Пациент 4	Пневмония правого легкого на стадии 1
Ребенок 1	Бронхит на острой стадии
Ребенок 2	Бронхит на острой стадии

Обработка сигнала

Для обработки сигнала был выбран программный продукт WinПОС, представляющий профессиональный инструмент для исследования динамических и медленно меняющихся процессов, графи-

ческого представления данных и оформления отчетов. С помощью данного программного обеспечения был обработан сигнал, полученный с каждого пациента. Рассматривали такие характеристики, как:

– автоспектр (основная частота спектра);

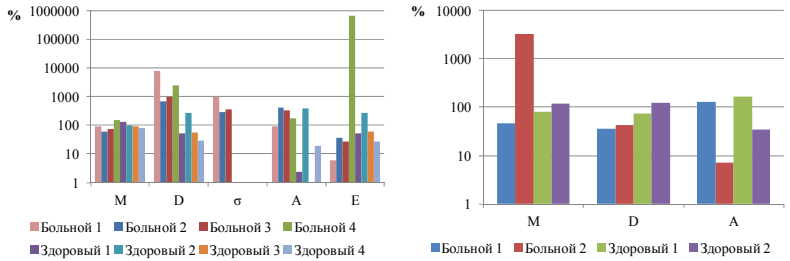
– вероятностная характеристика (оценки математического ожидания (M), дисперсия (D) среднеквадратичное отклонение (σ), асимметрия сигнала (A), эксцесс сигнала(E));

– арифметические операции (квадратичный сигнал);

– плотность вероятности (P).

Результаты и обсуждение

После обработки данных были построены гистограммы по вероятностным характеристикам сигналов (рис. 2). Все характеристики нормировались относительно среднего показателя у здоровых пациентов.



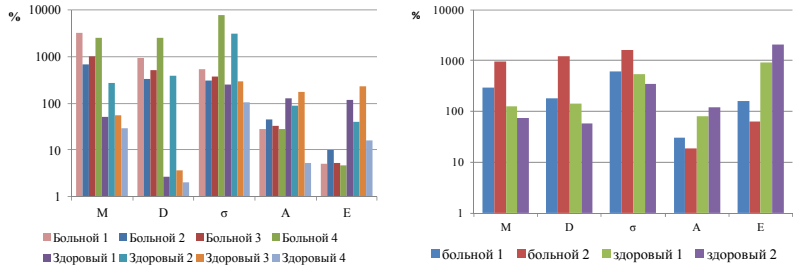
а *б*

Рис. 2. Гистограммы распредления вероятностных характеристик сигнала: для взрослых (*а*); для детей (*б*)

Как видно из гистограмм взрослых и детей, устойчивой зависимости между показателями здоровых и больных не выявлено, кроме этого, ряд показателей принимают отрицательные значения, поэтому на графиках не отображены. В связи с этим был рассмотрен квадратичный сигнал (рис. 3). Полученные данные взрослых здоровых пациентов ниже, чем у больных по математическому ожиданию, подобная зависимость наблюдается и у детей.

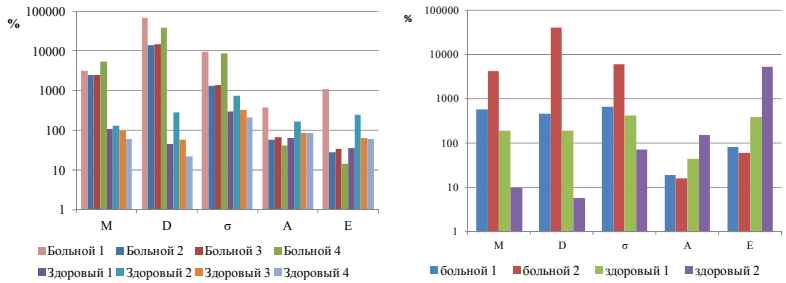
Для дальнейшего поиска зависимостей были проанализированы спектр и квадратичный спектр сигналов.

Видно, что повышение математического ожидания, дисперсии, среднеквадратического отклонения спектра (рис. 4) свидетельствует о наличии патологии, а повышение эксцесса и ассиметрии – об ее отсутствии.



а *б*

Рис. 3. Гистограммы распредления вероятностных характеристик квадратичного сигнала: для взрослых (*а*); для детей (*б*)



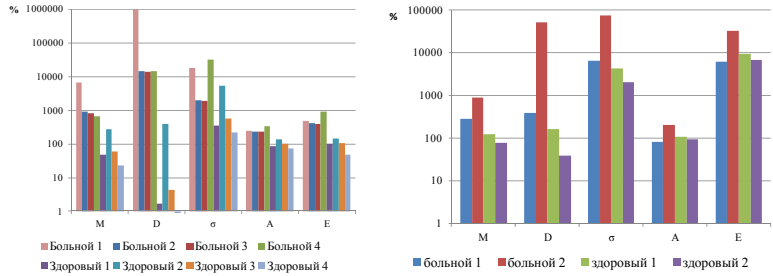
а *б*

Рис. 4. Гистограммы распредления вероятностных характеристик спектра: для взрослых (*а*); для детей (*б*)

Из вероятностных характеристик квадратичного спектра (рис. 5) также видно, что увеличение значений математического ожидания, дисперсии и среднеквадратического отклонения также свидетельствует о наличии заболеваний.

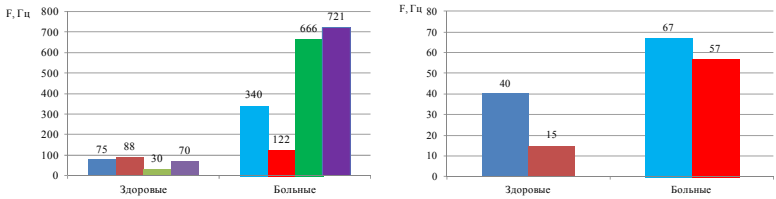
Из гистограмм видно увеличение указанных параметров у второго здорового пациента. Известно, что данный пациент злоупотребляет курением, и это проявляется как отклонение от здоровых пациентов.

Дальнейший анализ сигналов производился по оценке основной частоты спектра сигналов (рис. 6). Из гистограмм видно, что наличие патологий приводит к увеличению основной частоты спектра сигнала.



а *б*

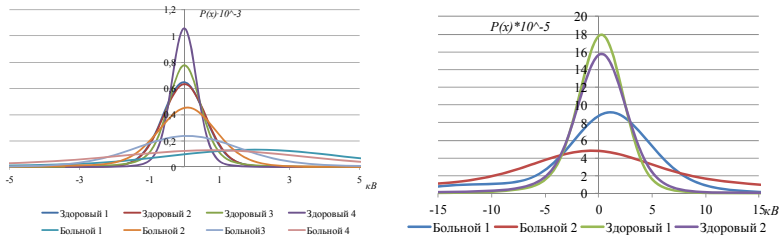
Рис. 5. Гистограммы распределения вероятностных характеристик квадратичного спектра: для взрослых (*а*); для детей (*б*)



а *б*

Рис. 6. Гистограммы распредления основной частоты спектра: для взрослых (*а*); для детей (*б*)

Оценка сигналов по плотности вероятности (рис. 7) также показывает наличие зависимости у здоровых и больных пациентов, по которым видно снижение плотности вероятности у больных приблизительно в 2 раза.



а *б*

Рис. 7. Гистограммы распредления плотностей вероятности: для взрослых (*а*); для детей (*б*)

Выводы

Оценка вероятностных характеристик спектра и квадратичного сигнала свидетельствует о высокой выявляемости отклонений от нормы по математическому ожиданию и дисперсии.

Наилучшая информативная способность по выявлению отклонений при аускультации выявлена у функции плотности вероятности сигнала, (при наличии заболеваний максимум функции уменьшается примерно в 4 раза).

Основная частота спектра сигнала также может рассматриваться как наиболее информативная составляющая сигнала, т. к. при наличии заболеваний частота становится существенно меньше (у взрослых в 3 раза, у детей в 2 раза).

Список литературы

1. *Адзерихо*, *И. Э.* Аускультация в практике врача: возможности и перспективы метода / И. Э. Адзерихо, И. Л. Лутик, М. И. Казакова // Медицинские новости. – 2014. – № 6. – С. 38–42.

2. *Гринченко*, *В. Т.* Сравнение эффективности электроакустических преобразователей устройств электронной аускультации / В. Т. Гринченко, А. А. Макаренкова // Акустичний вісник. – 2007. – Т. 10, № 1. – С. 17–29.

3. *Коробейникова*, *О. В.* Аппаратное и программное обеспечение системы электронной аускультации органов дыхания и сердечно-сосудистой системы / О. В. Коробейникова, Д. С. Кулешова // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2010. – № 1. – С. 91–97.

4. *Макаренкова*, *А. А.* Помехи, сенсоров-виброакселерометров, используемых для аускультации дыхательных шумов / А. А. Макаренкова, В. Н. Олийнык // Акустичний вісник. – 2006. – Т. 9, № 1. – С. 45–54.

5. *Волкова*, *Л. В.* Элементная база устройства медицинской аускультации / Л. В. Волкова, Д. В. Злобин, Л. В. Гущина // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сб. материалов III Всерос. науч.-техн. конф. асп., магистрантов и молодых ученых с междунар. участием, 2015. – С. 269–272.

Research of Informative Parameters Of Electronic Auscultation Signals

The article is researched with the informative parameters of the signal received from the electronic auscultoscope. For research the parameters of the signal is used software WinPOS. Research was subject to frequency spectrum, expectation value, variance, standard deviation of the signal. The comparative description of these parameters in healthy and diseased patients are report.

Keywords: electronic auscultoscope; auscultation; frequency of spectrum; dispersion; probability density function

УДК 534.8

С. Ю. Ворончихин, генеральный директор ЗАО «Интроскан Технолоджи»
E-mail: s.voronchikhin@introscan.ru
А. А. Самокрутов, генеральный директор ООО «АКС»
Ю. А. Седелев, генеральный директор ООО «ЭНТЭ»
E-mail: y.sedelev@ente-ltd.ru
Г. А. Полянкин, инженер ЗАО «Интроскан Технолоджи»
E-mail: g.polyankin@introscan.ru
М. Б. Исмагилов, магистрант гр. М03-092-1
E-mail: m.ismagilov@ente-ltd.ru
О. В. Муравьева, доктор технических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Результаты опытно-промышленной эксплуатации автономного роботизированного внутритрубного сканера-дефектоскопа A2072 IntroScan для диагностики технологических трубопроводов

Рассматриваются общие сведения, функциональные возможности, технические характеристики и результаты опытно-промышленной эксплуатации автономного роботизированного внутритрубного сканера-дефектоскопа A2072 IntroScan.

Ключевые слова: сканер-дефектоскоп; внутритрубная диагностика; ультразвуковой контроль; технологический трубопровод; неразрушающий контроль; дефект

Постановка задачи

Наша страна обладает развитой системой трубопроводного транспорта, причем большая часть была построена в 80-е годы прошлого столетия и эксплуатируется на данный момент за пределами ресурса проектной документации. Данный факт определяет проведение периодических работ по оценке технического состояния. Если проблема диагностики линейных объектов решена с помощью снарядов-дефектоскопов, то проблема диагностики сложных по конфигурации площадных объектов на данный момент практически не решена. В качестве примера такого объекта – технологические трубопроводы

© Ворончихин С. Ю., Самокрутов А. А., Седелев Ю. А., Полянкин Г. А., Исмагилов М. Б., Муравьева О. В., 2017

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00051).

(ТТ) компрессорных станций (КС) ПАО «Газпром», которые обладают отличительными характеристиками:

1) Опасный производственный объект.

2) Сложная по конфигурации топология, выполненная в основном в подземном исполнении.

3) Большой сортамент применяемых деталей Ду300 мм – Ду1400 мм.

4) Опасные трещиноподобные дефекты, являющиеся причиной разрывов и аварий.

5) Невозможность вывода из эксплуатации на длительный период ввиду загруженности сети трубопроводов.

6) Загрязнение полости трубопровода, препятствующее внутритрубной диагностике (ВТД).

7) Отсутствие достоверной информации о техническом состоянии.

Решение задачи

Общие сведения

Для решения поставленной задачи был разработан автономный роботизированный внутритрубный сканер-дефектоскоп А2072 IntroScan (рис. 1).

Обследование основного металла и сварных соединений элементов трубопроводов с применением:

1) Телевизионно-оптической системы (визуально-измерительный контроль).

2) Антенных решеток (АР) с акустическими датчиками с сухим точечным контактом (СТК) [1] (волноводный ультразвуковой (УЗ) контроль).

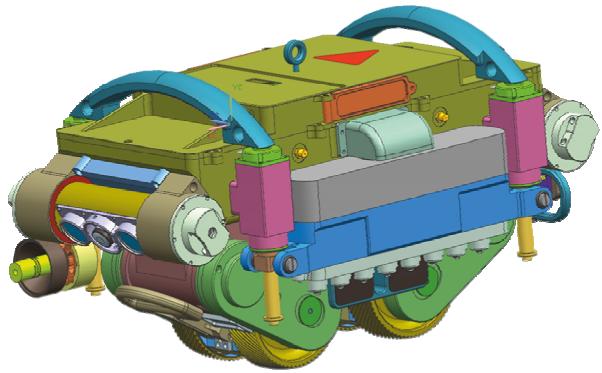


Рис. 1. Общий вид А2072 IntroScan

Блок управления

Блок управления (рис. 2) предназначен для управления сканером, формирования первичных диагностических данных и передачи их на ПК оператора.

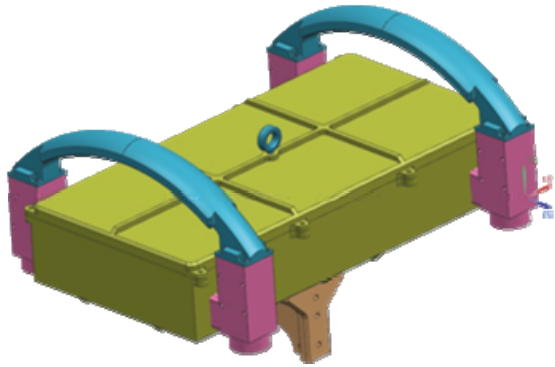


Рис. 2. Блок управления A2072 IntroScan

Управление движением, получение диагностической и видеоинформации на ПК оператора в режиме реального времени осуществляется по Wi-Fi-каналу (протяженность обследования (на удалении до 1500 п.м. от места загрузки).

Встроенные в сканер литий-феррум полимерные аккумуляторы емкостью 200 Вт·ч, обеспечивают до 8 часов автономной работы (в транспортном режиме – до 5 п.м./мин., в индикаторном режиме контроля – до 0,3 п.м./мин.).

Траспортная платформа

Передвижение сканера по произвольной траектории, исключая наиболее загрязненные участки внутренней полости трубопровода, обеспечивается транспортной платформой, состоящей из магнитных мотор-колесных модулей (рис. 3).

Магнитный модуль изготовлен на основе редкоземельного магнита с высокой остаточной магнитной индукцией.

Усилие отрыва магнитного мотор-колесного модуля от ферромагнитной поверхности – 600 Н (60 кгс).

В модуль встроены датчики Холла, контролирующие напряженность магнитного поля контура «колесо – поверхность», позволяющие фиксировать момент «отрыва» колеса от ферромагнитной поверхности.

Встроенный в мотор-колесный модуль 3-осевой МЭМС-инклинометр фиксирует угловое положение каждого модуля (погрешность измерения ±0,1 градус), что позволяет реализовать функции трассировки пройденного участка трубопровода (3D-топология) и управления движением сканера-дефектоскопа в автоматическом режиме.

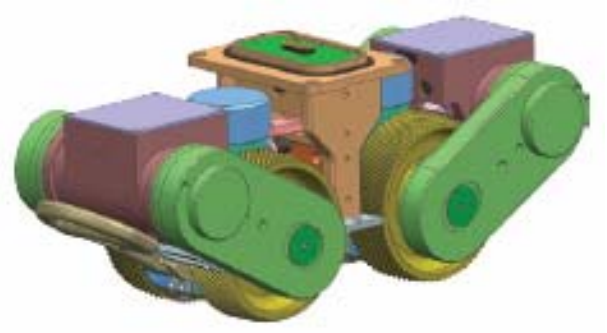


Рис. 3. Транспортная платформа A2072 IntroScan

Телевизионно-оптическая система

Блок телевизионно-оптической системы (рис. 4) обеспечивает визуальный контроль в процессе выполнения работ по ВТД.

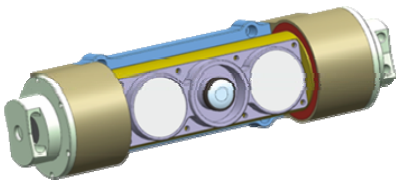


Рис. 4. Блок телевизионно-оптической системы A2072 IntroScan

Включает в себя HD-камеру с матрицей 5 Мп и объективом с углом зрения 180º, два светодиодных прожектора и привод поворота модуля в вертикальной плоскости.

Дополнительно в этом же модуле размещен датчик измерения концентрации метана и проекционный лазер.

Размещены два идентичных блока телевизионно-оптической системы – в передней и задней частях корпуса. Направление обзора определяется оператором. Вторая камера необходима при реверсном пере-

мещении сканера в трубах малого диаметра (Ду менее 500 мм), в которых невозможно выполнить разворот.

Блок акустической измерительной системы

Блок акустической измерительной системы (рис. 5) построен на базе УЗ-преобразователей с СТК, позволяющей возбуждать и принимать УЗ-колебания в стенке деталей трубопровода без применения контактной жидкости – только за счет трения керамического протектора преобразователя с поверхностью металла.

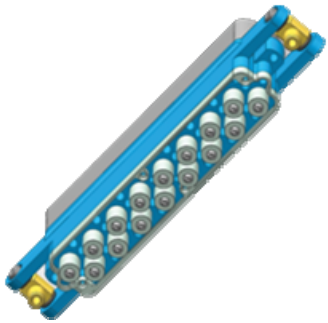


Рис. 5. Блок акустической измерительной системы A2072 IntroScan

Набор из 32 преобразователей СТК образует АР, фазируемую в требуемом направлении и формирующую направленные УЗ-волны в стенке деталей трубопровода. Диапазон частот от 20 до 80 кГц (поиск дефектов с высотой более 10 % от толщины стенки деталей, эффективная дальность контроля до 4000 мм).

Функциональные возможности

Назначение сканера-дефектоскопа A2072 IntroScan (табл. 1) [2]:

1) Обнаружение, селекция типов и измерение параметров дефектов основного металла труб и сварных соединений при проведении ВТД ТТ КС без нарушения их целостности.

2) Определение фактов наличия загрязнения и посторонних предметов в ТТ КС.

3) Определение 3D топологии (трассировки) и отклонения геометрии ТТ КС.

4) Обнаружение мест отслоения защитного покрытия.

Был проведен анализ имеющихся средств по ВТД, каждый из них имеет ряд недостатков, ограничивающих применение на данных объ-

ектах. Для решения этой задачи в 2013 г. организовано ЗАО «Интроскан Технолоджи».

Таблица 1. **Технические характеристики**

Параметр	Значение
Контроледоступность	Трубы, отводы, тройники, переходы Ду 300–1400 мм
Загрузка сканера	Люк-лазы, свечные линии от Ду 300 мм, технологические отверстия 340×240 мм
Количество элементов АР	32
Тип акустического контакта	Сухой, точечный
Диапазон частот преобразователя	20–80 кГц
Скорость передвижения сканера:	
В транспортном режиме	5 п.м./мин
В индикаторном режиме контроля	0,3–0,7 п.м./мин
Чувствительность	Дефекты более 10 % от толщины стенки деталей
Управление	радиоканал
Дальность контроля от места загрузки	1500 п.м.
Время непрерывной работы, не менее	8 ч
Габаритные размеры	310×230×210 мм
Масса, не более	18 кг
Диапазон рабочих температур	От –20 до +60 ºС

В первую очередь, был проведен анализ существующих методов неразрушающего контроля (НК), который можно было бы применить на сканере. Как видно из табл. 1, ввиду ограничений мы остановились на эхо-методах и лазерно-оптическом контроле. Также проведен ряд исследований различных акустических преобразователей для установки на сканер. Для решения поставленных задач пьезоэлектрический преобразователь с контактной жидкостью или электромагнитно-акустический преобразователь были неприменимы. Мы остановили свой выбор на датчиках с СТК, разработанные нашим партнером ООО «АКС», позволяющие проводить контроль без подготовки поверхности, без контактной жидкости, с одной точки сечения трубы провести все обследование.

В акустической измерительной системе реализован волноводный метод УЗ-контроля, при котором в объект вводятся упругие поперечные низкочастотные колебания с горизонтальной поляризацией, т. е. поперечные волны с SH-поляризацей, преимуществом которых явля-

ется незначительное затухание, недостатком – зависимость от геометрии объекта.

Результаты опытно-промышленной эксплуатации

Всего в 2016 г. было обследовано более 80 км ТТ. Ниже представлены сканограммы и сравнительные дефектограммы труб 2.3 (рис. 6, 7) и 2.4 (рис. 8, 9) по результатам ВТД и наружных методов НК в рамках расследования причин аварии (разрыва) на линейной части магистрального газопровода под железнодорожным переездом.

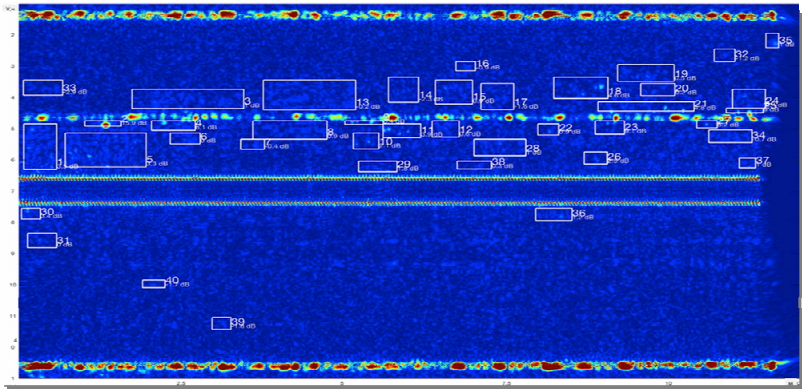


Рис. 6. Сканограмма по результатам ВТД трубы 2.3

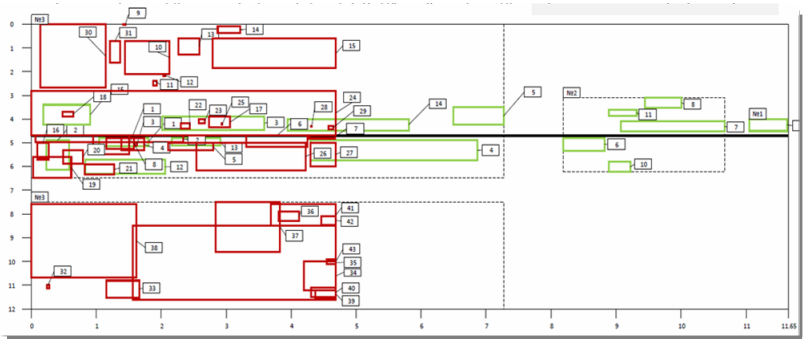


Рис. 7. Сравнительная дефектограмма ВТД и наружных методов НК трубы 2.3 (зеленым цветом выделены дефекты ВТД, красным – НК)

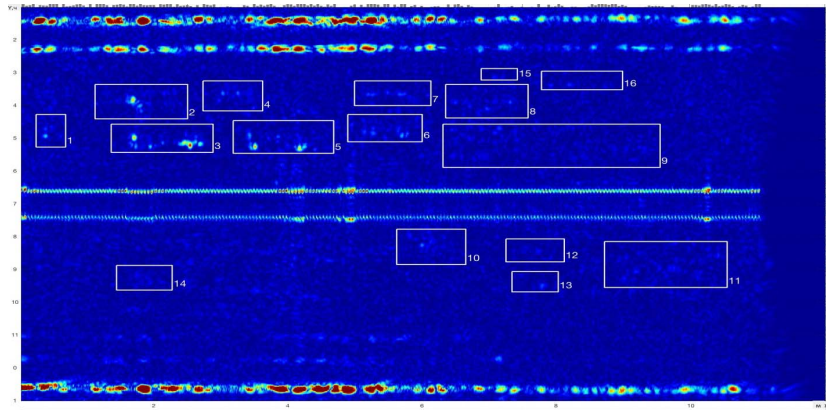


Рис. 8. Сканограмма по результатам ВТД трубы 2.4

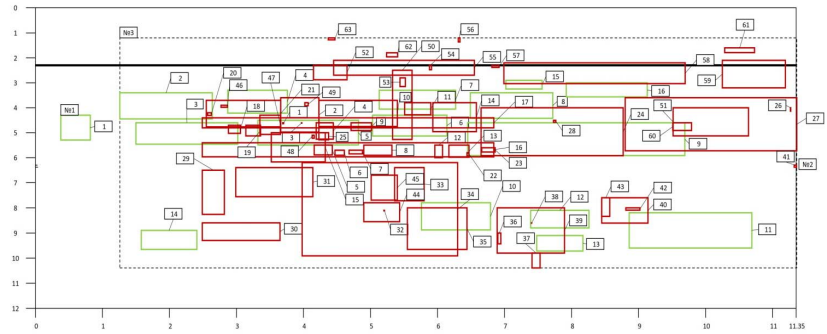


Рис. 9. Сравнительная дефектограмма ВТД и наружных методов НК трубы 2.3 (зеленым цветом выделены дефекты ВТД, красным – НК)

Сопоставление результатов анализа сканограмм после ВТД и данных, полученных наружными методами НК труб 2.3 и 2.4, представлены на рис. 10 и 11.

Количественное соотношение дефектов, обнаруженных при ВТД и НК, общее количество обнаруженных дефектов ВТД и НК, показаны на графиках 1 и 2 соответственно (рис. 12, *а* и *б*).

Сравнительная ведомость дефектов труб №1

Обследования участка ЛЧ МГ "Х-Х" х км, от тех. реза на Ю1 (маршрут №2), Ду х,

18.08.2016г.
дата проведения работ

№ п/п	Маркировка по ВТД	Характеристика труб: Тип детали	Диаметр, мм	Длина, м	Толщина, мм	Ориентация продольных швов, час		Характеристика дефекта после проведения ВТД сканером-дефектоскопом: №	Наименование дефекта	Расстояние: от торца, м	Расстояние: Угловое расположение, час	Длина, мм	Ширина, мм	Характеристика дефекта после проведения дополнительного обследования в шурфе: №	Наименование дефекта	Расстояние: от торца, м	Расстояние: от прод.шва, м	Расстояние: Угловое расположение, час	Длина, мм	Ширина, мм	Глубина, мм	Остаточная толщина, мм
1	2	4	6	7	8	9	10		11	12	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	2.3	труба прямая 1ш.	1420	11,85	18,7	4,7		5	«Объемный» дефект	+6,5	3,5	770	280									
								6	«Объемно-плоскостной» дефект	+8,19	4,8	630	200									
								7	«Объемный» дефект	+9,07	4,1	1600	160									
								8	«Объемный» дефект	+9,44	3,1	570	160									
								9	«Объемно-плоскостной» дефект	+11,05	4,0	580	190									
								10	«Объемный» дефект	+8,88	5,8	330	160									
								11	«Объемный» дефект	+8,88	3,6	430	100									
								1	«Плоскостной» дефект	+1,06	4,8	750	130	1	коррозия (на продольном шве)	+0,95	0,0	4,7	555	290	1,1	17,6
														3	зона каверн	+1,59	+0,09	5,0	40	40	3,5	15,2
														4	коррозия	+1,30	+0,05	4,8	345	195	0,9	17,8
														8	трещины	+1,16	+0,06	4,8	420	165	1,9	16,8
								2	«Объемно-плоскостной» дефект	+0,23	4,9	350	460	19	коррозия	+0,03	+0,22	5,6	585	330	0,3	18,4
														20	коррозия	+0,49	+0,13	5,3	310	215	0,8	17,9
														16	трещины	+0,09	+0,07	5,0	180	260	1,0	17,7
														2	коррозия (на продольном шве)	+0,07	0,0	4,7	2270	105	1,0	17,7
								3	«Объемный» дефект	+2,02	3,9	1570	210	22	зона каверн	+2,30	-0,15	4,2	140	75	2,0	16,7
														23	зона каверн	+2,58	-0,2	4,0	90	65	2,0	16,7
														17	трещины	+2,74	-0,12	3,9	320	170	1,0	17,7
														25	каверна	+2,93	-0,18	4,2	11	12	1,5	17,2
														24	коррозия	+0,0	-0,08	2,8	4690	700	1,0	17,7
								4	«Объемно-плоскостной» дефект	+4,3	4,9	2570	310	27	коррозия	+4,30	+0,12	5,0	390	370	1,0	17,7
								12	«Объемный» дефект	+0,83	5,7	1230	230	21	коррозия	+0,82	+0,27	5,9	460	165	0,5	18,2
								13	«Объемно-плоскостной» дефект	+2,16	4,8	750	120	5	коррозия	+2,11	+0,06	5,0	690	120	1,6	17,1
														2	коррозия (на продольном шве)	+0,07	0,0	4,7	2270	105	1,0	17,7
														26	коррозия	+2,54	+0,08	5,0	1680	430	0,5	18,2
								14	«Объемный» дефект	+3,95	4,0	1880	180	28	каверна	+4,31	-0,13	4,3	Ø18,0		1,0	17,7
														29	зона каверн	+4,58	-0,08	4,3	65	50	2,5	16,2
														24	коррозия	+0,0	-0,08	2,8	4690	700	1,0	17,7
								15	«Объемно-плоскостной» дефект	+0,19	3,4	720	310	18	зона каверн	+0,48	-0,26	3,7	165	70	2,8	15,9
														24	коррозия	+0,0	-0,08	2,8	4690	700	1,0	17,7
														6	коррозия (на продольном шве)	+3,31	0,0	4,7	940	180	2,5	15,2
														7	коррозия (на продольном шве)	+4,28	0,0	4,7	395	45	2,5	15,2
														9	зона забоин	+1,42	-1,54	0,0	30	15	1,0	17,7
														10	коррозия	+1,44	-0,98	0,7	690	520	1,0	17,7
														11	задир	+1,88	-1,05	2,4	50	65	0,9	17,8
														12	задир	+2,03	-1,20	2,1	30	35	0,6	18,1
														13	коррозия	+2,27	-1,16	0,6	315	250	0,7	18,0
														14	зона задиров	+2,87	-1,48	0,1	345	100	0,3	18,4
														15	коррозия	+2,79	-0,97	0,6	1900	460	1,2	17,5
														30	коррозия	+0,14	-0,75	12,0	1005	990	1,0	17,7
														31	коррозия	+1,21	-1,13	0,7	160	340	0,8	17,9
														32	зона каверн	+0,24	+2,33	11,0	35	50	2,0	16,7
														33	коррозия	+1,16	+2,22	10,8	505	265	1,3	17,4
														34	зона каверн	-0,61	+1,90	10,0	490	450	1,5	17,2
														35	коррозия	-0,0	+1,40	8,5	3125	1155	1,1	17,6
														36	коррозия	+3,81	+1,14	7,9	310	150	0,9	17,8
														37	коррозия	+2,84	+0,99	7,5	990	780	0,5	18,2
														38	коррозия	+0,0	+1,12	7,6	1620	1140	0,9	17,8
														39	зона плен	-0,08	+2,37	11,2	315	125	0,3	18,4
														40	зона плен	-0,77	+2,34	11,1	380	150	0,3	18,4
														41	зона плен	-0,30	+1,02	7,6	1005	335	0,4	18,3
														42	трещины	-2,14	+1,14	8,1	220	130	0,4	18,3
														43	зона плен	-2,62	+1,93	9,9	140	80	0,4	18,3

Примечание:

1 Ст.5* - Приняты следующие сокращения: 1ш. - одношовная, 2ш. - двухшовная, б/ш - бесшовная.
2 Ст.13* - тип дефекта определен согласно РД 03-606-03 Инструкция по визуально измерительному контролю
3 Ст.14* - Значение со знаком "+" указывает расстояние от торца, первого по ходу газа трубы, "-" - от противоположного.
4 Ст.17* - длина дефекта - размер дефекта вдоль оси трубопровода.
5 Ст.18* - ширина дефекта - размер дефекта поперек оси трубопровода.
7 Ведомость составлена по результатам визуально-измерительного, вихретокового контроля и ультразвуковой толщинометрии, согласно "Технического задания"
8 Ст.20* - Остаточная толщина стенки трубы указана ориентировочно в месте предполагаемого максимального поражения трубы и после вышлифовывания дефекта.
9 При обследовании использовались следующие приборы и оборудование:

ВИК:	*Лупа измерительная ЛИ-3-10х*	зав.№ *3*	св-во о поверке № *14/3515*	от *18.03.2016*
ВИК:	*Угольник поверочный 90° слесарный плоский 2 кл. точности УП 160*	зав.№ *20111130164*	св-во о поверке № *14/3532*	от *21.03.2016*
ВИК:	*Рулетка измерительная ЭНКОР РФ3-3-16 РФ 3-3-16 3м*	зав.№ *3*	св-во о поверке № *14/2961*	от *21.03.2016*
ВИК:	*Линейка измерительная металлическая (0-300)мм*	зав.№ *3*	св-во о поверке № *14/2930*	от *21.03.2016*
ВИК:	*Универсальный шаблон сварщика УШС-3*	зав.№ *362*	св-во о поверке № *14/2974*	от *21.03.2016*
ВИК:	*Штангенциркуль ШЦ-I-150-0.05*	зав.№ *201109291293*	св-во о поверке № *14/3540*	от *21.03.2016*
УЗТ (УЗК):	*А1212 Мастер*	зав.№ *102556*	св-во о поверке № *9/626*	от *04.03.2016*
ВК:	*МВД-2МК*	зав.№ *284*	св-во о поверке № *9/64*	от *03.03.2016*
Твердометрия:	*ТЭМП-4*	зав.№ *048834*	св-во о поверке № *11/1773*	от *24.02.2016*
Магнитное ярмо	*Magnaflux*	зав.№ *-*	св-во о поверке №	от *-*

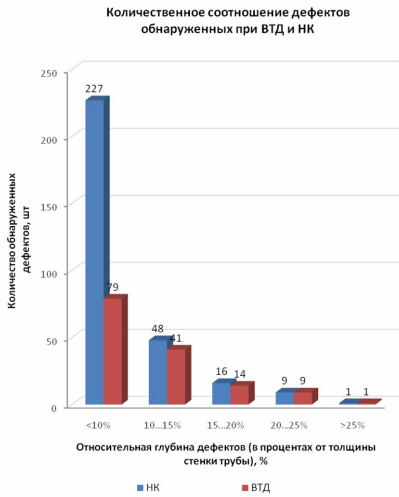
ООО "ЭНТЭ" Лаборатория неразрушающего контроля ДЛЯ ЗАКЛЮЧЕНИЙ 13

инженер-дефектоскопист лаборатории НК ООО "ЭНТЭ" /М.Б. Исмагилов/
(... №3 (Твердометрия) №0030-3333 от 10.04.15г.)
(Удостоверение по ВИК, УК, МК, ЭК №НОАП-0014-01-3800 от 31.03.15г.)

Рис. 10. Сопоставление результатов анализа сканограмм после ВТД и данных, полученных наружными методами НК трубы 2.3

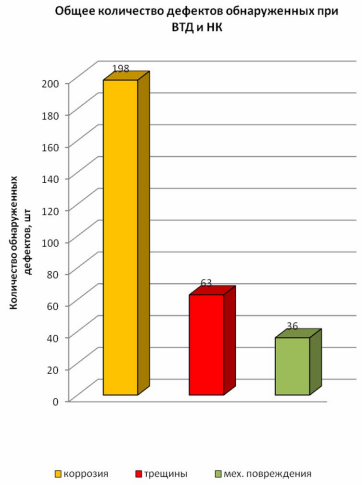
№ п/п	Маркировка по ВТД	Характеристика труб: Тип детали	Диаметр, мм	Длина, м	Толщина, мм	Ориентация продольного шва, час	Характеристика дефекта после проведения ВТД сканером-дефектоскопом: Наименование дефекта	Расстояние от торца, м	Угловое расположение, час	Длина, мм	Ширина, мм	Характеристика дефекта после проведения дополнительного обследования в шурфе: Наименование дефекта	Расстояние от торца, м	Расстояние от вразгиба, м	Угловое расположение, час	Длина, мм	Ширина, мм	Глубина, мм	Остаточная толщина, мм
1	2	4	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
							7 «Объемный» дефект	+5,13	3,3	1140	280										
							11 «Объемный» дефект	+8,86	8,2	1830	520										
							12 «Объемный» дефект	+7,39	8,1	870	260										
							13 «Объемный» дефект	+7,48	9,1	690	230										
							15 «Объемный» дефект	+7,02	2,9	540	130										
							16 «Объемный» дефект	+7,92	3,0	1210	210										
												17 трещины	+0,0	−0,51	0,4	4330	150	1,6	17,0
							1 «Объемный» дефект	+0,38	4,3	440	370	18 зона заварки	−0,39	−0,88	4,7	180	120	4,0	14,6
												19 коррозия	−0,65	−0,90	4,7	220	160	1,3	17,3
							2 «Объемно-плоскостной» дефект	+1,26	3,4	1380	390	10 коррозия	−1,74	−0,29	5,3	1170	390	1,6	17,0
												49 прибарка ЗХЗ	−1,53	−0,50	5,3	50	45	-	-
												4 зона заварки	−1,70	−0,53	6,0	255	245	2,2	15,8
												9 зона заварки	−2,22	−0,55	6,6	305	115	1,7	16,9
							3 «Объемно-плоскостной» дефект	+1,5	4,6	1520	320	15 коррозия	−1,03	−0,84	5,0	805	435	1,6	17,6
												17 трещины	+0,0	−0,51	0,4	4330	150	1,6	17,0
												25 зона заварки	−1,74	−0,98	5,0	145	105	2,0	16,8
												48 прибарка ЗХЗ	−1,64	−0,94	5,1	50	45	-	-
							4 «Объемный» дефект	+2,87	3,3	890	340	11 зона заварки	−3,02	−0,44	3,8	390	180	2,7	15,9
												14 коррозия	−3,44	−0,43	3,8	650	430	2,0	16,6
												14 коррозия	−3,44	−0,43	3,8	650	430	2,0	16,6
							5 «Объемно-плоскостной» дефект	+3,32	4,5	1500	370	17 трещины	+0,0	−0,51	4,4	4330	150	1,6	17,0
												24 коррозия	+4,16	−0,66	4,0	2120	715	1,8	16,8
							6 «Объемный» дефект	+5,03	4,3	1110	310	28 трещины	−5,24	−0,78	4,5	35	30	0,8	17,8
							8 «Объемный» дефект	+6,49	3,4	1230	380	27 коррозия	+6,31	−0,45	3,6	2500	790	1,7	16,9
												50 коррозия	−2,84	+6,11	2,5	200	1030	1,1	17,5
							9 «Объемный» дефект	+6,45	4,6	3240	490	60 трещины	−1,56	−0,90	4,6	280	115	0,6	18,0
												27 коррозия	+6,31	−0,45	3,6	2500	790	1,7	16,9
												40 коррозия	−5,06	2,17	7,6	600	275	0,6	18,0
							10 «Объемный» дефект	+5,76	7,8	1030	400	42 трещины	+6,32	−2,28	8,0	210	35	0,9	17,7
												43 трещины	−5,06	−2,28	7,6	120	275	0,8	17,8
							14 «Объемный» дефект	+1,58	8,9	830	280	34 коррозия	−1,49	−1,60	8,2	2320	1380	0,7	17,9
												1 зона заварки	+1,20	−0,61	4,6	14	13	2,0	16,6
												2 коррозия	+1,17	+0,33	3,6	570	510	1,5	17,1
												3 дефект	−1,48	−0,59	4,6		26,0	2,3	16,1
												5 зона заварки	−1,67	+1,0	5,5	270	145	3,5	15,1
												6 зона заварки	−1,98	−1,06	5,7	140	75	5,3	13,3
												7 зона заварки	−2,19	−1,05	5,7	200	55	2,5	16,1
												8 зона заварки	−2,41	−0,97	5,5	420	150	4,2	14,4
												12 зона заварки	−3,47	−0,97	5,5	115	105	4,3	14,1
												13 зона заварки	−3,68	−0,97	5,5	200	180	2,2	16,6
												16 трещины	+0,0	−0,92	5,4	4330	210	1,5	17,1
												20 зона заварки	+0,08	−0,68	4,2	55	40	2,0	16,6
												21 коррозия	+0,06	−0,50	3,7	1110	395	2,3	16,3
												22 задир	−3,95	−1,11	5,8	50	30	0,8	17,8
												23 зона заварки	−4,17	−1,09	5,6	200	65	3,9	14,7
												26 задир	−0,08	+0,64	4,0	5	30	0,8	17,8
												29 коррозия	+0,0	−2,25	6,5	330	655	1,0	17,6
												30 коррозия	+0,0	−1,50	8,6	1160	260	1,0	17,6
												31 коррозия	−0,50	−2,51	6,4	1150	430	0,2	18,2
												32 дефект	−2,71	−2,24	8,1	8	7	2,3	16,3
												33 зона заварки	−2,87	−2,49	6,4	440	490	1,8	16,8
												35 коррозия	−3,06	−1,58	8,0	800	615	1,2	17,4
												36 зона рисок	+4,41	−1,72	9,0	45	160	0,3	18,3
												37 зона заварки	−4,92	−1,46	9,8	120	220	3,6	15,0
												38 дефект	−4,91	−1,88	8,6		455,0	3,0	15,6
												39 коррозия	−4,40	−1,61	8,0	1005	670	1,0	17,6
												41 зона заварки	−0,0	−2,78	6,3	35	30	1,0	17,6
												44 трещины	−2,41	−2,10	7,5	533	380	1,6	17,6
												45 трещины	−2,52	−2,54	6,7	390	370	0,9	17,7
												46 зона задиров	+0,28	+0,61	3,9	95	30	0,5	18,1
												47 зона задиров	+0,86	+0,71	4,3	305	285	0,3	18,3
												48 прибарка ЗХЗ	−1,64	−0,94	5,1	50	45	-	-
												50 коррозия	−2,84	−0,11	2,5	200	1030	1,1	17,5
												52 зона задиров	+1,66	0,0	2,3	500	215	0,3	18,3
												53 зона заварки	−2,95	−0,17	2,8	80	130	2,1	16,5
												54 зона заварки	−3,79	−0,04	2,3	50	65	2,2	16,4
												55 коррозия (по показаниям ВИК)	−1,96	0,0	2,1	2100	220	1,6	17,6
												56 зона задиров (по показаниям ВИК)	−3,82	−0,24	1,2	25	60	0,3	18,3
												57 зона задиров (по показаниям ВИК)	−4,12	0,0	2,3	130	30	-	-
												58 коррозия (по показаниям ВИК)	−4,50	0,0	2,2	2705	310	0,8	17,8
												59 коррозия	−0,16	0,0	2,1	940	410	0,8	17,8
												61 трещины	−0,62	−0,23	1,6	443	70	0,6	18,0
												62 трещины	−2,75	−0,19	1,8	165	60	0,8	17,8
												63 трещины	−1,88	−0,40	1,2	100	30	0,4	18,2
1	2.4	Труба прямая 1ш.	1420	11,35	16,7	2,3															

Рис. 11. Сопоставление результатов анализа сканограмм после ВТД и данных, полученных наружными методами НК трубы 2.4



а

График 1



б

График 2

Рис. 12. Количественное соотношение дефектов, обнаруженных при ВТД и НК (*а*) и количество обнаруженных дефектов ВТД и НК (*б*)

Выводы

1. Проведение ВТД ТТ КС без нарушения их целостности.

2. Передвижение сканера-дефектоскопа по произвольной траектории, исключая наиболее загрязненные участки внутренней полости трубопровода и, как следствие, отсутствие необходимости проведения очистных мероприятий перед проведением ВТД.

3. Прохождение сканера-дефектоскопа по внутренней полости ТТ КС по элементам различного сортамента (трубы, отводы, тройники, переходы, ЗРА) Ду 300–1400 мм.

4. Отсутствие в необходимости сплошного сканирования обеспечивается реализованным в акустической-измерительной системе волноводным УЗ контролем (поперечной УЗ-волной SH-поляризации).

5. По результатам анализа данных, полученных при ВТД и НК наружными методами, установлено, что при внутритрубном автоматизированном УЗ-контроле сканером-дефектоскопом А2072 IntroScan выявлены дефекты свыше 15 % от толщины стенки трубы с вероятностью 92 %, что соответствует предъявляемым требованиям к техническим средствам ВТД ТТ КС и ДКС ПАО «Газпром» [3].

Список литературы

1. *Самокрутов, А. А.* Ультразвуковые низкочастотные пьезопреобразователи с сухим точечным контактом и их применение для неразрушающего контроля / В. Г. Шевалдыкин, А. А. Самокрутов, В. Н. Козлов // Контроль. Диагностика – 2003, № 2. – С. 30–39.

2. ООО «Газпром ВНИИГАЗ». Реестр вновь разработанных роботизированных диагностических комплексов ВТД ТТ КС, соответствующих техническим требованиям ПАО «Газпром» и допущенным к опытно-промышленной эксплуатации. – URL: http://vniigaz.gazprom.ru/d/textpage/54/84/reestr_dk-vtdttks-2016.pdf (дата обращения: 21.11.2016).

3. Сканер-дефектоскоп А2072 IntroScan // Акустические контрольные системы. – URL: http://www.acsys.ru/production/detail/vnutritrubnyy-avtonomnyy-robotizirovannyy-skaner-defektoskop-a2072-introscan/ (дата обращения: 21.11.2016).

The Autonomous Robotic Intra-Tube Scanner-Flaw-Detector A2072 IntroScan Use Test Results of Technological Pipelines Diagnostics

The article presents general information, functional abilities, specifications and pilot development results of autonomous robotic in line scanner flaw detector A2072 Introscan.

Keywords: scanner – flaw-detector; in line inspection; ultrasonic testing; process pipe-line; non-destructive testing, defect

УДК 621.039.3

В. Л. Гребнев, кандидат медицинских наук, доцент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Оптимизация радиометрической аппаратуры, применяемой в медицине и экологии

Вмонтированный в радиометр-рентгенметр ДП-5А(Б) блок импульсной световой индикации позволил визуализировать показания прибора о величине радиационного загрязнения окружающей среды.

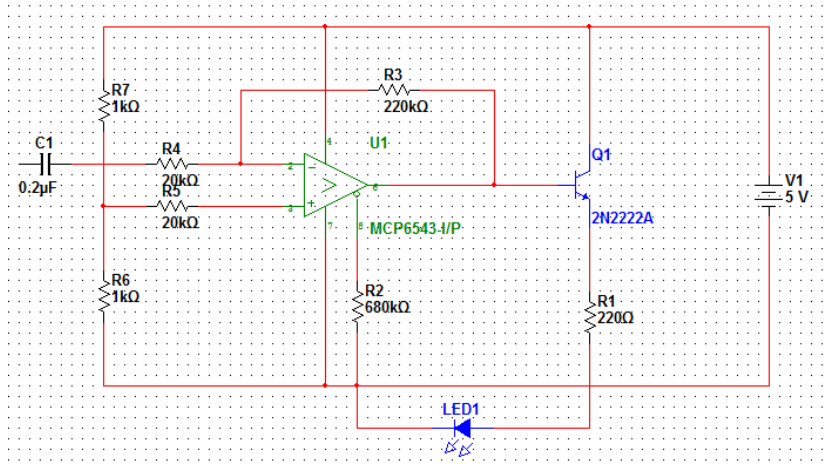
Ключевые слова: радиометр-рентгенметр ДП-5А(Б); радиационное загрязнение окружающей среды; блок импульсной световой индикации; техносферная безопасность

После аварии на Чернобыльской атомной электростанции перед медицинскими работниками и экологами встала задача определения степени загрязненности радиактивными веществами окружающей природной среды и человека. Обнаружение радиационного загрязнения местности и оценка степени опасности ионизирующих излучений проводились с помощью радиометра-рентгенметра ДП-5А для последующего принятия решений об эвакуации населения и возможности работы подразделений гражданской обороны.

Дозиметрические приборы (ДП) конструкции ДП-5А(Б) представляют собой комбинацию радиометра и рентгенметра. Ими можно обнаружить и количественно оценить как загрязненность различных поверхностей бета- и гамма-активными веществами, так и уровни гамма-радиации на местности. Диапазон измерений прибора от 0,05 до 200 р/ч. Элементами прибора являются измерительный пульт, зонд и головные телефоны (наушники). Корпус пульта выполнен из пластмассы. На его передней панели размещены шкала микроамперметра, переключатель поддиапазонов, ручки регулирования. Внутри корпуса имеется отсек для сухих элементов питания прибора. Зонд состоит из цилиндрического корпуса и ручки. Корпус зонда имеет пять окон, заклеенных пленкой для защиты от влаги. Снаружи корпуса имеется экран; он способен, поворачиваясь, открывать и закрывать окна. Головные телефоны обычного типа (наушники) служат для ориентировочной оценки величины радиационной загрязненности местности с помощью слухо-

© Гребнев В. Л., 2017

вого анализатора. При создании блока [1] импульсной световой индикации (БИСИ) к радиометру-рентгенметру модели ДП-5А(Б) проектировались следующие эргономические условия: БИСИ должен быть простым в изготовлении и ремонте, надежным и показательно информативным в работе, небольшим по размерам, а также нетребующим принципиальных изменений в его матричной схеме [2]. Основной элемент БИСИ состоит из усилителя напряжения, выполненного на интегральной схеме (рисунок).



Электрическая схема дополнительного модуля световой индикации радиоактивности

В операционном усилителе К14ОУД12, вследствие изменения сопротивления в цепи входа, появляется возможность регулировки тока потребления микросхемы и изменения напряжения питания в пределах от 1,5 до 15 В. В условиях радиационного загрязнения окружающей среды газоразрядный счетчик ДП-5А(Б) продуцирует разряды (сигналы), которые после корректирования в цепи электрической схемы радиометра-рентгенметра поступают на световой индикатор. Затем импульс сигнала проходит через фильтр-конденсатор С1 и поступает на вход усилителя напряжения. Изменив полярность и увеличив амплитуду примерно в 11 раз, сигнал регулирует ток потребителя цепи эмиттера, влияя на интенсивность окраски светодиода красного свечения. Следовательно, любая информация о радиационном загрязнении, поступающая с газоразрядного счетчика, вызывает вспышки светового

индикатора. При этом яркость и частота загорания светового сигнала находятся в прямо пропорциональной зависимости от уровня радиационного загрязнения.

Блок импульсной световой индикации вмонтирован в корпус пульта, а светодиод ярко-красного свечения вынесен на переднюю (лицевую) панель прибора – шкалу микроамперметра. Электрическая схема дозиметрического прибора радиометра-рентгенметра конструкции ДП-5А(Б), дополненная БИСИ, позволила сделать наглядной радиационную разведку местности и определять степень загрязненности окружающей среды как в экстремальных условиях, так и в ночное время суток. При этом даже в случае выхода из строя стрелочного микроамперметра и головных телефонов (наушников) световой сигнал красного свечения, интенсивность окрашивания и частота вспышек которого прямо пропорциональна уровню радиационного загрязнения окружающей среды, позволяет быстро и однозначно принимать правильное решение в создавшейся чрезвычайной ситуации.

Радиометр-рентгенметр ДП-5Б используется и при проведении лабораторных занятий со студентами на кафедре «Техносферная безопасность» ИжГТУ для направления 20.03.01 «Техносферная безопасность» по профилям: «Безопасность технологических процессов и производств», «Защита в чрезвычайных ситуациях» и «Инженерная защита окружающей среды». Вмонтированный в радиометр-рентгенметр ДП-5Б БИСИ позволил сделать проводимые учебные занятия по оценке радиационной безопасности объекта более наглядными [3]. В лабораторных условиях сухие элементы питания (с целью экономии и электробезопасности) могут быть заменены сетевым телефонным зарядным устройством модели отечественного производства.

Список литературы

1. *Гребнев*, *В. Л.* Дополнительный модуль световой индикации уровня радиактивности к радиометру-рентгенметру ДП-5А(Б) // Удостоверение на рационализаторское предложение № 54, выданное 16.11.1978 г. БРИЗом ИГМИ.

2. *Гребнев*, *В. Л.* К вопросу об усовершенствовании медицинской аппаратуры // Научно-технический прогресс и охрана здоровья в условиях перестройки : тез. докл. науч.-практ. конф. (1988, Ижевск). – Ижевск, 1988. – С. 36–37.

3. *Гребнев*, *В. Л.* К вопросу о модификации радиометрической аппаратуры, применяемой в экологии // Ученые Ижевского государственного университета – производству : тез. науч.-практ. конф. (1996, Ижевск). – Ижевск, 1996. – С. 88–89.

Optimization of Radiometric Equipment Used in Medicine and Ecology

The built-in radiometer rentgenmetr DP-5A(B) block pulse of light indication allow to visualize the level of radiation pollution.

Keywords: radiometer-roentgenmeter DP-5A(B); the radiation pollution; power pulse of light indication; Technosphere safety

УДК 615.47616-073

И. А. Громова, магистрант
С. А. Мурашов, кандидат технических наук, доцент
E-mail: sm-ii@yandex.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
Д. С. Мурашова, инженер
ООО «ИРЗ-Тест», г. Ижевск

Исследование свойств материалов фантомов мягкой биологической ткани и вязкоупругих сред

Приведены результаты исследования упругих свойств материалов, пригодных для изготовления фантомов мягких биологических тканей для применения их при разработке аппаратуры и методик ультразвуковых исследований, в частности, в области эластографии.

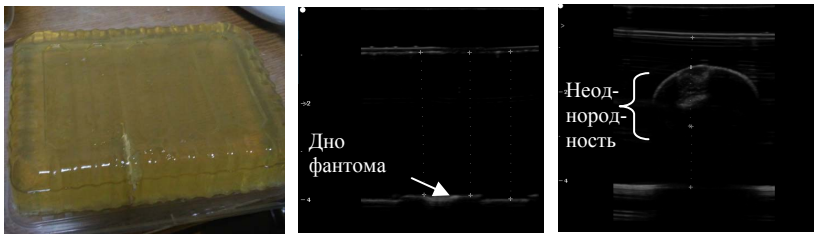
Ключевые слова: фантом мягких тканей; ультразвук; эластография

Фантомы биологических тканей, имитирующие их геометрические, физические и (или) функциональные особенности, широко используются как в медицине, например, при обучении специалистов, так и в технике при разработке аппаратуры и методов диагностирования. На кафедре «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики» при исследованиях в области ультразвуковой эластографии и эластометрии – сравнительно новых методах оценки упругих свойств мягких тканей и органов, находящих применение, в том числе при диагностировании предфиброзных состояний, фиброза, цирроза и других заболеваний печени [1–3], – используются преимущественно фантомы, выполненные из желатина, что обусловлено рядом их достоинств: достаточно высокой степенью соответствия упругим параметрам мягких тканей (плотность, скорость звука, модули упругости); простотой изготовления фантома с заданным значением модуля Юнга в достаточно широких пределах от 10 до 100 кПа; однородностью при взаимодействии с ультразвуком, что позволяет увидеть на В-изображении четкое очертание искусственных неоднородностей и границ самого фантома (рис. 1); доступностью ингредиентов. Имеется возможность увеличе-

© Громова И. А., Мурашов С. А., Мурашова Д. С., 2017

Работа выполнена по государственному заданию Министерства образования и науки РФ ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова» на 2014–2016 гг. в рамках проектной части проведения научно-исследовательских работ (проект № 3.751.2014/К).

ния вязкости желатинового фантома и снижения модуля сдвига путем добавления, например, касторового масла со спиртом [4].



а *б* *в*

Рис. 1. Фантом из желатина (модуль Юнга 30 кПа): внешний вид (*а*); ультразвуковое изображение без неоднородности (*б*); ультразвуковое изображение с неоднородностью (*в*)

Использование желатиновых фантомов осложняется малым сроком их пригодности к эксплуатации (5–10 дней хранения при пониженной температуре +5 °С), достаточно быстрым разрушением под действием статических или динамических нагрузок (особенно при модулях Юнга менее 30 кПа), а также зависимостью упругих свойств от температуры [5]. Указанные недостатки затрудняют обеспечение метрологической достоверности измерений в тех случаях, когда требуется транспортировка фантома (изменение условий окружающей среды), или при больших временных интервалах между измерениями. Таким образом, задача выбора материала для изготовления фантомов мягкой ткани остается актуальной.

Использование фантомов с мелкозернистой структурой может оказаться целесообразным для моделирования диссипативных процессов при взаимодействии ультразвука с мягкими тканями. В качестве одного из вариантов можно рассматривать фантом, изготовленный путем варки *манной крупы* в воде в течение 2–3 часов и последующего охлаждения (рис. 2, *а*). Значение модуля Юнга такого фантома находится в диапазоне 30–50 кПа, однако, несмотря на видимую простоту приготовления, обеспечить требуемое значение модуля Юнга и правильную форму неоднородности затруднительно. К недостаткам также следует отнести разрушение под действием механических нагрузок и малый срок хранения (несколько дней). Глубина проникновения ультразвука, излучаемого медицинским сканером на частоте 5 МГц, не превышает 2–3 см, что может оказаться недостаточным для использования фантома в статическом методе эластографии. Так, в представленных на

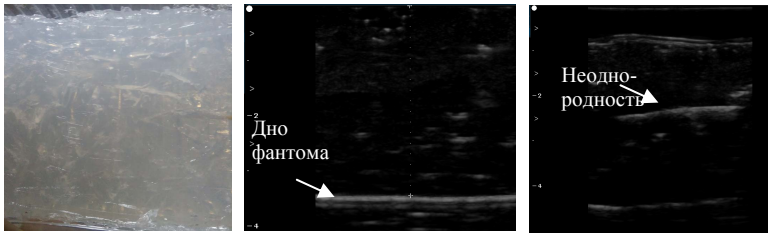
рис. 2, *б–в* ультразвуковых В-изображениях дно фантома не видно вследствие рассеяния ультразвука зернистой структурой, однако неоднородности в ней хорошо различимы за счет отличия по яркости и наличия достаточно четких границ.

а *б* *в*

Рис. 2. Фантом из манной крупы (модуль Юнга 35 кПа): внешний вид (*а*); ультразвуковое изображение без неоднородности (*б*); ультразвуковое изображение с неоднородностью (*в*)

С целью увеличения срока эксплуатации опробованы новые материалы для изготовления фантомов мягкой ткани.

Фантом из *силиконового герметика* и его ультразвуковое изображение представлены на рис. 3. Технология изготовления: в емкость равномерно выдавить герметик и оставить затвердевать 6–7 дней.



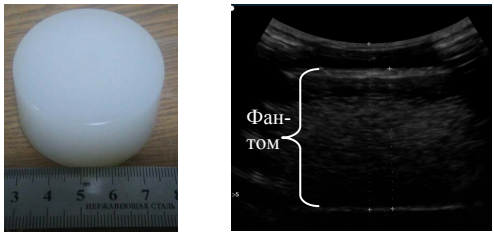
а *б* *в*

Рис. 3. Фантом из силиконового герметика (модуль Юнга 750 кПа): внешний вид (*а*); ультразвуковое изображение без неоднородности (*б*); ультразвуковое изображение с неоднородностью (*в*)

Достоинства: имеет неоднородности, напоминающие по структуре естественные неоднородности в мягких тканях человека (сосуды, волокна), достаточно хорошая сохраняемость свойств во времени в течение 1–2 месяцев без необходимости охлаждения. Недостатки: слож-

ность обеспечения однородной структуры: при заливке фантома образуются пузырьки воздуха, которые при проведении эластографического исследования будут затруднять идентификацию неоднородностей и определение упругих свойств ткани; сильный запах уксуса; высокое значение модуля Юнга (более 700 кПа); большое время изготовления (около недели), которое существенно увеличивается с увеличением объема фантома.

Для изготовления фантомов мягкой ткани интерес могут представлять мягкие силиконы, предназначенные для создания форм с высокой степенью геометрической детализации. Образец фантома из *силиконового компаунда* Эластолюкс-М представлен на рис. 4.



а *б*

Рис. 4. Фантом из силиконового компаунда:
внешний вид (*а*); ультразвуковое изображение фантома (*б*)

Технология приготовления: жидкий силикон заливают в форму, затем из рассчитанной пропорции добавляют катализатор. Полученный состав тщательно перемешивается (аккуратно, чтобы не допустить появление пузырьков) при температуре не ниже +20 °С и остается затвердевать на 2–4 дня. При соблюдении технологии фантомы имеют однородную структуру, способны восстанавливать форму после деформации, не разрушаются при многократном использовании. При неаккуратной заливке в форму и в процессе перемешивания возможно появление маленьких пузырьков воздуха, что в большинстве случаев нежелательно. При некачественном размешивании или пониженной температуре возможно неравномерное или недостаточное затвердевание компаунда, что также может привести к образованию неоднородностей, липкой поверхности или жидкому состоянию всего фантома или отдельных его участков.

Исследованы несколько образцов, изготовленных из мягкого силикона двух марок, а также с разным соотношением масс силикона и катализатора. Экспериментальные значения модуля Юнга, равные

700 кПа для компаунда Эластолюкс и 350–400 кПа для компаунда Эластолюкс-М, существенно превышают значения здоровой печени и большинства других мягких тканей, что несколько ограничивает область применимости рассматриваемых материалов в эластографии, например, моделированием новообразований, сосудов, жировой тканью. Результаты исследований представлены в таблице. Видно, что с уменьшением массовой доли катализатора на 25 % модуль Юнга материала Эластолюкс-М снизился с 400 до 350 кПа, однако дальнейшее уменьшение его концентрации будет препятствовать затвердеванию компаунда.

Свойства фантомов мягкой ткани

Материал фантома мягкой ткани	Отношение массы силикона к массе катализатора	Значение модуля Юнга, кПа	Время изготовления	Срок хранения
Желатин	–	10–100	4 часа	2–10 дней
Манная крупа	–	30–50	2–3 часа	2–5 дней
Силиконовый герметик	–	750	6–7 дней	30–60 дней
Силиконовый компаунд Эластолюкс	100 : 2	700	2–4 дня	Более года
Силиконовый компаунд Эластолюкс-М	100 : 2	400	–	–
	100 : 1,5	350	–	–

Таким образом, охлажденный раствор желатина в воде остается материалом, наиболее близким по упругим свойствам к здоровой печени и ряду других мягких тканей. Фантомы на основе манной крупы имеют на порядок большее значения модуля Юнга и могут быть рекомендованы при исследовании процессов рассеяния и затухания ультразвука в биологических и вязкоупругих средах. Фантом из силиконового герметика имеет наибольшее значение модуля Юнга среди рассмотренных – 750 кПа, сложен в изготовлении, но может имитировать волокнистые структуры. Фантомы из мягких силиконовых компаундов Эластолюкс и Эластолюкс-М долговечны, можно рекомендовать их для моделирования твердых неоднородностей в фантомах мягких тканей, а также при разработке методик ультразвуковых исследований свойств резиноподобных сред. Сохраняется потребность в поиске материалов для создания фантомов многократного использования, имитирующих упругие свойства биологических тканей с низкими значениями модуля Юнга менее 10 кПа.

Список литературы

1. Capabilities of elastography methods in ultrasound diagnostics / O. V. Muravieva, O. P. Bogdan, S. A. Murashov, D. S. Murashova // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS) (16–18 Oct. 2014, Tomsk, Russia). – P. 1–6. – DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986937.

2. Elasticity Moduli Estimation Using Different Elastography Methods: A Phantom Based Approach / D. S. Murashova, S. A. Murashov, S. A. Bogdan, S. A. Muravieva, E. P. Kuznetsov, S. O. Yugova // Instrumentation engineering, electronics and telecommunications – 2015 : Paper book of the I International Forum (November, 25–27, 2015, Izhevsk, Russia). – Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2016. – 208 p.

3. Исследование статической эластографии методом математического моделирования / О. В. Муравьева, Д. С. Мурашова, С. А. Мурашов, О. П. Богдан // Медицинская техника. – 2014. – № 3. – С. 31–34.

4. Development of oil-in-gelatin phantoms for viscoelasticity measurement in ultrasound shear wave elastography / M. M. Nguyen, S. Zhou, J.-L. Robert, V. Shamdasani, H. Xie // Ultrasound in Med. & Biol, 2014. – Vol. 40, No. 1. – Pp. 168–176.

5. *Демин*, *М. Ю*. Эластография сдвиговых характеристик мягких биологических тканей / М. Ю. Демин, Н. В. Прончатов-Рубцов. – Н. Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2014. – 114 с.

The Study of Material Properties of Phantoms of Soft Biological Tissues and Viscoelastic Media

The paper presents the results of the study of elastic properties of materials suitable for the fabrication of phantoms of soft biological tissues for their application in the development of instruments and methods for ultrasonic research, in particular in the field of elastography.

Keywords: soft tissue phantom; ultrasound; elastography

УДК 612.64:537.29

Т. П. Зайнаева, врач акушер-гинеколог
ГАУЗ «Городская поликлиника № 4», г. Казань
E-mail: eristics@mail.ru
С. Б. Егоркина, доктор медицинских наук, доцент
ФГБОУ ВО «Ижевская государственная медицинская академия»

Влияние вращающегося электрического поля низкой частоты на систему «мать – плацента – плод»

В работе проведено исследование по изучению влияния вращающегося электрического поля низкой частоты на систему «мать – плацента – плод» крыс-самок. Доказано, что это воздействие является стрессогенным, о чем свидетельствует повышение уровня гормонов стресса в крови экспериментальных животных и изменение адаптационного индекса Гаркави – Квакиной. Показано, что вращающееся электрическое поле низкой частоты формирует плацентарную недостаточность, гипоксию плода и увеличивает общую эмбриональную смертность.

Ключевые слова: техногенное вращающееся электрическое поле; система «мать – плацента – плод»

Введение

Современное развитие цивилизации обусловливает высокие потребности в энергообеспечении. Вследствие интенсивного использования электрической и электромагнитной энергии многократно увеличился электромагнитный фон окружающей среды, сформировался новый антропогенный фактор окружающей среды – «электромагнитное загрязнение». Отсутствие органов чувств у человека, воспринимающих электромагнитные излучения, определяет этот фактор как особо агрессивный, поскольку, не ощущая воздействий, невозможно его избегать [1].

Электромагнитные воздействия вызывают снижение адаптивных резервов организма, нарушение иммунитета и негативно влияют на функции внутренних органов и систем организма [2]. Особо чувствительны к действию электромагнитных излучений половые и эмбриональные клетки, поскольку активно пролиферируют и обладают высоким уровнем метаболизма [3, 4].

По данным авторов [3, 5] наиболее опасными являются вращающиеся электромагнитные поля (ВЭП). Эти поля образуются в резуль-

© Зайнаева Т. П., Егоркина С. Б., 2017

тате использования в промышленности и быту переменного трехфазного электрического тока и в незащищенных экраном помещениях могут составлять до 80 % всех электромагнитных полей.

Цель работы: оценить изменения в системе «мать – плацента – плод» при действии ВЭП низкой частоты на беременных крыс.

Материалы и методы

Опыты проведены на беременных белых беспородных крысах массой 180–220 г с 10-го дня беременности. Протокол эксперимента, содержание животных и выведение их из опыта осуществляли в соответствии с принципами биоэтики, изложенными в «Международных рекомендациях по проведению медико-биологических исследований с использованием животных» (1985 г.) и приказе МЗ РФ № 708н от 23.08.2010 г. «Об утверждении правил лабораторной практики». Проведение исследования одобрено комитетом по биомедицинской этике Ижевской государственной медицинской академии, аппликационный № 306 от 24.04.2012 г.

До начала эксперимента животные были разделены на две группы. Контрольную группу (n = 32) составили беременные самки, не подвергающиеся экспериментальным воздействиям. Животных опытной группы ежедневно по 60 минут в течение 10 дней подвергали действию вращающегося электрического поля, помещая беременных крыс (n = 27) в центральную часть установки, моделирующей ВЭП (получено решение о выдаче патента на полезную модель, заявка № 2016100293/14 от 05.09.2016 г. «Устройство для исследования влияния вращающегося электрического поля на биологические объекты»).

Установка, формирующая ВЭП, была разработана на основе физической модели линии электропередач [6] и состояла из трансформатора, двух пар электродов, конденсатора, резистора. Напряжение между электродами *1* и *2* использовали в качестве опорного напряжения. Относительно этого опорного напряжения при помощи фазосдвигающей цепочки (фазовращателя, образованным последовательно соединенным конденсатором и резистором) формировалось второе напряжение со сдвигом фазы (α~45°), которое поступало на электроды *3* и *4*. В результате в пространстве между электродами формировалось ВЭП, физическое действие которого определялось суперпозицией двух ортогональных полей, амплитудные значения напряженности которых составляло 30,5 и 75,9 В/м соответственно. Поля изменялись по синусоидальному закону с частотой 50 Гц. Электропитание установки осуществляли от сети переменного тока напряжением 220 В. В части установки, формирующей ВЭП, выделялось пространство (относи-

тельно центра установки) ограниченное по осям *X*, *Y*, *Z*, где однородность напряженности электрического поля наибольшая (рис. 1).

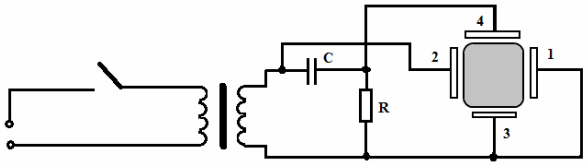


Рис. 1. Электрическая схема установки:
С – конденсатор; R – резистор; *1*, *2*, 3, *4* – электроды

В конце эксперимента (19-й день беременности) животных опытных и контрольной групп выводили из эксперимента путем введения этаминал-натрия в дозе 60 мг/кг внутрибрюшинно, осуществляли забор крови из полостей сердца, а также проводили аутопсию самок и плодов.

В плазме крови экспериментальных животных определяли уровень глюкокортикоидов [7, 8]. Неспецифическую резистентность экспериментальных животных оценивали по адаптационному индексу (АИ) Гаркави – Квакиной – Уколовой [9].

При макроскопическом исследовании последов оценивали степень их кровенаполнения, форму, цвет и консистенцию, а также осуществляли органометрию (измерение массы, объема и площади последов). У извлеченных плодов оценивали внешний вид и определяли массу тела. Показатель общей эмбриональной смертности рассчитывали по формуле Щербака [10].

При микроскопическом исследовании последов определяли площадь межворсинчатого пространства.

Для сравнения параметров в группах использовали *U*-критерий Манна – Уйтни. Для выявления корреляционной зависимости был использован ранговый тест Спирмена. Различия выборок считали достоверными при уровне значимости $p < 0,05$. Результаты обработаны статистически с использованием программ *Microsoft Excel 2005*, *Statistica 6,0*.

Результаты исследования и обсуждение

Воздействие вращающегося электрического поля сопровождалось повышением содержания стресс-гормонов в плазме крови экспериментальных животных. При этом уровень 11-ОКС достоверно увеличился до 563,7 ± 26 мкг/л ($p < 0,01$), при 312,8 ± 21,4 мкг/л в контроле, катехоламины с 0,037 ± 0,003 мкг/л до 0,06 ± 0,009 мкг/л ($p > 0,05$), что позволяет рассматривать ВЭП, как стрессорный фактор.

Адаптационный индекс Гаркави – Квакиной у животных контрольной группы соответствовал «реакции тренировки» – 0,46 ± 0,02, а при действии ВЭП «реакции спокойной активации» – 0,51 ± 0,03.

Установлено, что «реакция активации» характеризуется большими энергетическими затратами, чем «реакция тренировки», волнообразными изменениями – синтеза и распада веществ в организме. Однако истощения резервов не наблюдается [9, 11]. Увеличение адаптационного индекса Гаркави – Квакиной у опытных животных при действии ВЭП возможно объяснить большей активностью регуляторных систем организма, участвующих в реализации стресса.

Морфологическое исследование последов экспериментальных животных выявило изменения во внезародышевых органах между контрольной и опытной группами.

Последы крыс контрольной группы имели дисковидную форму с центральным прикреплением пуповины. Средняя масса составила 0,59 ± 0,03 г, объем 0,57 ± 0,04 см^3, площадь материнской поверхности 1,77 ± 0,51 см^2.

В опытной группе последы преимущественно имели овальную форму с эксцентричным прикреплением пупочного канатика. Масса (0,44 ± 0,02 г.), объем (0,42 ± 0,04 см^3) и площадь (1,43 ± 0,05 см^2) плаценты достоверно ($p < 0,01$) снижены на 25,4, 26,3 и 18,7 % соответственно.

При микроскопическом исследовании плодной части плацент, полученных от опытных самок, наблюдалось значительное расширение и резкое полнокровие материнских сосудов, их разрывы. Площадь межворсинчатого пространства плодной части плаценты в среднем составила 609 628 ± 98 080 мкм² ($p < 0,01$), при контроле 43 819 ± 2 482 мкм². В расширенных сосудах содержались агрегированные эритроциты, обусловливающие сладж и стаз крови.

От самок контрольной группы получены плоды средней массой 3,5 ± 0,46 г, показатель общей эмбриональной смертности у них составил 6,9 ± 0,7 %. В опытной группе наблюдалось снижение средней массы плодов – 1,54 ± 0,22 г ($p < 0,01$) и увеличение показателя общей эмбриональной смертности до 85,9 ± 0,8 % ($p < 0,01$).

Известно, что для оптимизации функций плаценты при действии патогенных факторов в провизорном органе запускается ряд компенсаторно-приспособительных реакций [12, 13]. Уменьшение площади и объема последов позволяют судить о перераспределении тока крови к месту имплантации (централизация кровоснабжения) и формированию «экономичного режима» работы с выключением периферической зоны плаценты, что необходимо для сохранения беременности. Расширение межворсинчатого пространства в плодном отделе плаценты

обусловлено увеличенным притоком крови и необходимо для сближения кровотоков матери и плода с целью создания оптимальных условий поступления кислорода к плоду [12]. При этом агрегированные эритроциты и сладж, наблюдаемые в синусоидах последов в ходе экспериментов, свидетельствуют об изменении реологических свойств крови и нарушении микроциркуляции в плаценте.

Выявленные морфологические изменения последов и плодов могут свидетельствовать о развитии плацентарной недостаточности. Плацентарная недостаточность представляет собой результат сложных материнско-плодовых взаимоотношений в ответ на действие патогенного фактора и вызывает комплекс морфофункциональных нарушений в плаценте, предопределяющих задержку развития плода и его гибель. При этом основой патофизиологических сдвигов в плаценте является нарушение маточно-плацентарно-плодового кровотока вследствие спазма маточных артерий и эндотелиальной дисфункции сосудов при повышенных уровнях гормонов стресса в плазме крови [14].

Выводы

1. ВЭП низкой частоты оказывает стрессогенный эффект на регуляторные системы организма.

2. ВЭП приводит к формированию плацентарной недостаточности, что проявляется структурными перестройками плацент (снижение массы, объема, площади, расширение межворсинчатого пространства), задержкой развития плодов и повышением эмбриональной смертности.

Благодарность

Авторы выражают благодарность сотрудникам кафедры вычислительной техники факультета информатики и вычислительной техники ИжГТУ в конструировании экспериментальной установки, формирующей ВЭП (решение о выдаче патента на полезную модель, заявка № 2016100293/14 от 05.09.2016 «Устройство для исследования влияния вращающегося электрического поля на биологические объекты»).

Список литературы

1. *Лизарев*, *А. В.* Динамика изменений показателей гормонального гомеостаза у работающих при воздействии электромагнитных полей промышленной частоты // Бюллетень Восточно-сибирского научного центра. – 2013. – № 1(89). – С. 188–190.

2. *Зайнаева*, *Т. П.* Состояние репродуктивной системы экспериментальных животных в условиях вращающегося электрического поля низкой частоты / Т. П. Зайнаева, А. В. Гущин, С. Б. Егоркина // Магнитные явления : сб. ст. – 2015. – Вып. 5. – С. 126–130.

3. *Белкин*, *А. Д.* О роли техногенных вращающихся электрических полей в эндо- и экзоэкологических взаимосвязях (обзор литературы) // Медицина труда и промышленная экология. – 1999. – № 6. – С. 27–30.

4. *Замай*, *Т. Н.* Влияние ЭМИ на живые организмы // Биомедицинские технологии и электроника. – 2005. – № 4. – С. 21–32.

5. Многослойный экран встроенных трансформаторных подстанций / Ю. Г. Рябов, Г. В. Ломаев, И. Б. Гуров, К. В. Ермаков. – URL: http://www.rusnauka.com/32_NII_2014/Ecologia/ 4_177837.doc.htm (дата обращения: 20.03.2017).

6. *Пучков*, *Г. Г.* Электрические поля электропередачи СВН и их моделирование / Г. Г. Пучков, Л. С. Перельман, М. Н. Задорожная // Электропередачи сверхвысокого напряжения и экология : сб. науч. тр. ЭНИН им. Г. М. Кржижановского, 1986. – С. 140–154.

7. *Резников*, *А. Г.* Методы определения гормонов : справ. пособие. – Киев : Наук. думка, 1980. – 399 с.

8. *Матлина*, *Э. Ш.* Клиническая биохимия катехоламинов. – М. : Медицина, 1967. – 304 с.

9. Адаптационные реакции и уровни реактивности как эффективные диагностические показатели донозологических состояний/ Л. Х. Гаркави, Г. Н. Толмачев, Н. Ю. Михайлов [и др.] // Вестник Южного научного центра. – 200. – Т. 3. № 1. – С. 61–66.

10. *Щербак*, *Б. И.* Гигиеническая оценка поливинилацетатных дисперсий : автореф. дис. канд. мед. наук. – Кемерово, 1976. – 27. с.

11. *Мифтахутдинов*, *А. В.* Стресс-чувствительность кур и методы ее оценки // Актуальные вопросы ветеринарной биологии. – 2011 – № 3(11). – С. 31–38.

12. *Милованов*, *А. П.* Патология системы мать-плацента-плод: руководство для врачей. – М. : Медицина, 1999. – 448 с.

13. *Бородин*, *Ю. И.* Влияние вибрации на систему «мать – плод» в эксперименте / Ю. И. Бородин, С. И. Колесников. – М. : Литтерра, 2014. – 192 с.

14. *Ушакова*, *Г. А.* Регуляторные и адаптационные процессы в системе «мать – плацента – плод» при гестозе различной степени тяжести / Г. А. Ушакова, Ю. В. Рец // Акуш. и гин. – 2008. – № 4. – С. 11–16.

The Influence of Rotating Electric Field of Low Frequency on the Mother-Placenta-Fetus System

The paper is aimed at studying the impact of rotating electric field of low frequency on the mother – placenta – fetus system in rats. It is proved that this impact is stressful, as evidenced by the increase in the level of stress hormones in the blood of experimental animals and change index of adaptation Garkavi – Kvakina. Showed that rotating electric field forms placental insufficiency, fetal hypoxi and increases general embryonic mortality.

Keywords: rotating electric field; mother-placenta-fetus system

УДК 681.586.4+620.179

Д. В. Злобин, кандидат технических наук, доцент кафедры «ПМИКД»
Л. В. Гущина, магистрант
E-mail: sssoryforme@mail.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Оптимизация конструкции пьезоэлектрических преобразователей крутильной волны для контроля линейно-протяженных объектов

Описана система акустических преобразователей, реализующая волноводную методику неразрушающего контроля прутков крутильной волной. Показаны способы оптимизации преобразователей с целью повышения качества излучения-приема сигнала.

Ключевые слова: акустический контроль; крутильная волна; излучающие и приемные преобразователи; линейно-протяженные объекты

Разработанная в ИжГТУ, на кафедре «ПМИКД», методика контроля линейно-протяженных объектов предполагает возбуждение и прием стержневой волны (или волны другого типа) с торца объекта контроля [1, 2]. Развитием данной методики является использование крутильного типа волн, обладающих рядом преимуществ [3, 4], таких как более высокая чувствительность, лучшая лучевая разрешающая способность, отсутствие дисперсии и т. д. Предложенный в [3, 4] прототип датчика приема-излучения крутильной волны раздельно-совмещенного типа сочетает в себе простоту конструкции, длительный срок эксплуатации, некритичность к качеству торца объекта контроля (рис. 1).

Однако для полной реализации данных качеств в конструкции преобразователя должны быть учтены некоторые технологические моменты. Одним из условий получения импульсов малой длительности и обеспечения высокой чувствительности к дефектам является способ реализации контакта датчика и объекта. Возможные его варианты показаны на рис. 2 [5].

При использовании варианта *а* диапазон диаметров прутков, в которых формируется сигал многократных отражений, удовлетворяющий требованиям контроля, весьма узок, что вызвано фазовым расхождением волн, излучаемой передней (*а*) и задней (*б*) гранями преобра-

© Злобин Д. В., Гущина Л. В., 2017
Работа выполнена в рамках проекта № 15-19-00051 Российского научного фонда.

зователей. Вариант (*б*) обеспечивает увеличение рабочего диапазона диаметров, однако приводит к неустойчивости положения ПЭП. Вариант (*в*) обеспечивает наилучшее качество сигнала и устойчивость положения ПЭП, однако является технологически более сложным в реализации. Экспериментально установлено, что наиболее оптимальным соотношением характеристик сигнала и технологичности является контакт через линейный протектор конечной (≈0,25 размера ПЭП) ширины (вариант *г*). Диапазоны диаметров прутков, в которых обеспечивается оптимальная форма импульсов при многократных отражениях, приведены в табл. 1 [6, 7].

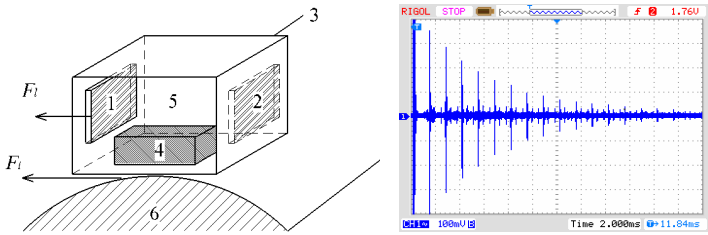


Рис. 1. Конструкция раздельно-совмещенного пьезопреобразователя крутильной волны и пример осциллограммы прутка с дефектом: *1* – излучающая пьезопластина; *2* – приемная пьезопластина; *3* – корпус; *4* – магнит; *5* – демпфер; *6* – объект контроля

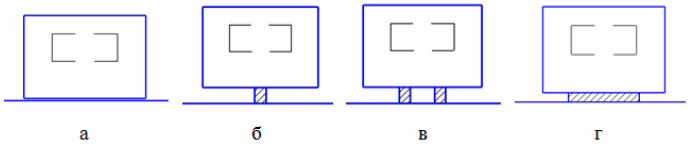


Рис. 2. Варианты контакта датчика и объекта

Таблица 1. **Отношение формы контактирующей поверхности к диаметру прутков**

Форма контактирующей поверхности	*а*	*б*	*в*	*г*
Диаметры прутков	8–10	5–12	4–14	4–12

Вторым существенным фактором, определяющим качество излучения-приема преобразователя крутильных волн, является степень демпфирования его конструкции. Недостаточное демпфирование датчика приводит к удлинению импульса, искажению его формы, ухудшению отношения «сигнал/шум» вследствие появления на дефекто-

грамме реверберационных шумов. Однако чрезмерное демпфирование вызывает значительное снижение амплитуды полезного сигнала и, как следствие, увеличение размера выявляемого дефекта (т. е. ведет к снижению чувствительности метода) [8, 9]. Наиболее простым способом определения оптимальной степени демпфирования является анализ сигнала непосредственно с объекта контроля (например, эталонного прутка с искусственным дефектом). Однако при этом в полученном сигнале становится невозможно оценить влияние на форму импульса самого ПЭП и объекта контроля. Более информативным является анализ переходной характеристики преобразователя [10].

Для ее изучения ПЭП был подключен по схеме, представленной на рис. 3. С генератора на излучающую пластину подавались импульсы прямоугольной формы ($V_{\text{р–р}}$ = 10 В, f = 100 Гц), форма переходной характеристики (ПХ) фиксировалась осциллографом на приемной пластине, синхронизация осуществлялась по фронту импульса генератора. Исследования проводились на экспериментальном образце преобразователя с габаритными размерами 10×12×10 мм, изготовленным из листовой меди толщиной 0,4 мм. Степень демпфирования регулировалась изменением площади датчика, контактирующей с материалом с высоким затуханием (герлен). На рис. 4 представлены переходные характеристики датчика и соответствующие фрагменты серий многократно отраженных импульсов (5-е отражение).

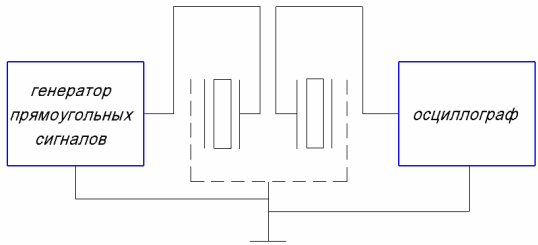


Рис. 3. Блок-схема установки

По данным графикам можно сделать следующие выводы:

– для данного типа ПЭП существует оптимальная степень демпфирования, обеспечивающая наилучшую выявляемость дефектов, при этом ПХ датчика может служить основой для выбора оптимального количества заполнения объема датчика демпфирующим веществом;

– конструкция датчика имеет 2 основных резонанса – высокочастотный ($f \approx$ 200 кГц), не попадающий в полосу полезного сигнала, и слабо

влияющий на качество дефектограммы. Его причиной являются изгибные колебания боковых поверхностей ПЭП. Резонансом, определяющим качество сигнала, является более низкочастотный ($f \approx 30$ кГц), длительность которого и формирует в основном вид принятых импульсов, область максимальной чувствительности ПЭП и величину мертвой зоны. Параметры серий импульсов для разных степеней демпфирования приведены в табл. 2.

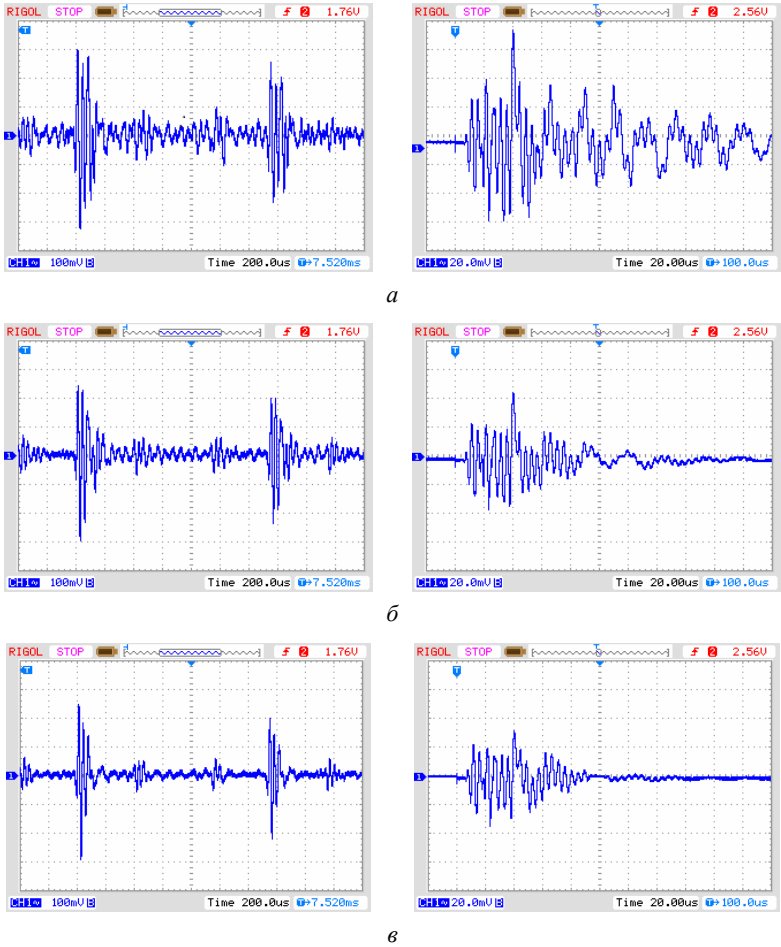
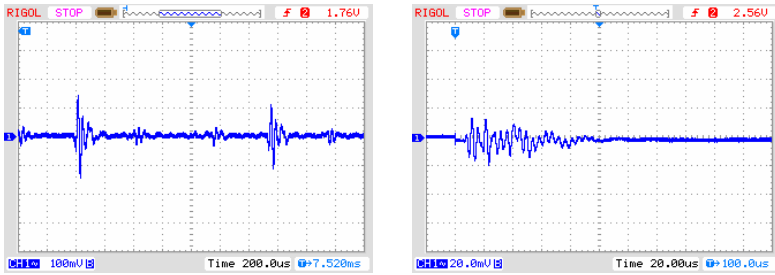


Рис. 4. Форма ПХ ПЭП и осциллограммы 5-го отражения при демпфировании 25 % поверхности датчика (*а*), 50 % (*б*), 75 % (*в*) *(начало)*



г

Рис. 4. Форма ПХ ПЭП и осциллограммы 5-го отражения при демпфировании 75 % (*в*) и полном демпфировании (*г*) *(окончание)*

Таблица 2. **Параметры серий импульсов**

Процент демпфируемой поверхности	Длительность НЧ-резонанса	Отношение «сигнал/шум»	Мертвая зона
25	200	1,7	0,85
50	80	2,5	0,45
75	40	4,7	0,25
100	25	4,2	0,18

Список литературы

1. *Буденков, Г. А.* Основные закономерности взаимодействия волн Похгаммера с дефектами / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая // Дефектоскопия. – 2004. – № 2. – С. 33–46.

2. Акустическая дефектоскопия прутков с использованием многократных отражений / Г. А. Буденков [и др.] // Дефектоскопия. – 2004. – № 8. – С. 52–58.

3. *Злобин, Д. В.* Контроль линейно-протяженных объектов с использованием крутильной волны / Д. В. Злобин, Л. В. Гущина // Приборостроение в XII веке – 2015. Интеграция науки, образования и производства : электрон. науч. изд. : сб. материалов XI Междунар. науч.-техн. конф. (25–27 нояб. 2015 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашников, 2016. – С. 185–189. - ISBN 978-5-7526-0742-4.

4. *Злобин, Д. В.* Акустические преобразователи для контроля линейно-протяженных объектов крутильными волнами / Д. В. Злобин, Л. В. Гущина // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : электрон. науч. изд. : сб. тр. IV Всерос. науч.-техн. конф. асп., магистр. и молодых ученых с междунар. участием (20–21 апр. 2016 г.). – Ижевск, 2016. – С. 354–357. – ISBN 978-5-9906851-5-4.

5. Взаимодействие крутильных волн с продольными трещинами прутков и труб / Г. А. Буденков, О. В. Муравьева, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства : тр.

науч.-техн. конф. (Ижевск, 13–14 апр. 2004 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2005 – С. 353–358.

6. 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.

7. *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.

8. Оптимизация систем подмагничивания проходных электромагнитно-акустических преобразователей объемных волн для неразрушающего контроля пруткового проката / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, Е. Н. Кокорина, В. Д. Стерхов, Д. В. Малютин // Датчики и системы. – 2013. – № 2(165). – С. 2–9.

9. *Муравьев*, *В. В.* Контроль качества термической обработки прутков из стали 60С2А электромагнитно-акустическим методом / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, Е. Н. Кокорина // Дефектоскопия. – 2013. – № 1. – С. 20–32.

10. 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.

11. *Смирнов*, *А. Н.* Структурно-фазовое состояние и ресурс длительно работающего металла технических устройств опасных производственных объектов, перспективы дальнейшего развития методов оценки работоспособности / А. Н. Смирнов, В. В. Муравьев, С. В. Фольмер // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 1. – С. 22–32.

Design Optimization of Piezoelectric Transducers of Torsional Wave for Testing of Linearly Extended Objects

The system of acoustic transducers that implements the guded wave method for non-destructive testing of rods using torsional wave is described in this paper. The ways for optimization of transducers to improve the quality of signal radiation and receiving are presented.

Keywords: acoustic testing; torsional wave; radiating and receiving transducers; linearly extended objects

УДК 620.179.16

С. В. Казанцев, студент
E-mail: sergokazancev@mail.ru
И. В. Булдакова, аспирант, младший научный сотрудник
М. А. Понькин, студент
А. Ю. Будрин, студент
Л. В. Волкова, кандидат технических наук, доцент
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), СибГИУ (г. Новокузнецк)

Исследование распространения головной волны в рельсах со сварным стыком

Статья содержит расчет преобразователя головной волны: расчет угла падения и скорости в призме, а также измерение скорости головной волны в рельсах со сварным соединением при установке преобразователя с поверхности катания. Скорость головной волны уменьшается в зоне термического влияния.

Ключевые слова: головная ультразвуковая волна; рельс; сварное соединение; скорость ультразвука; пьезопреобразователь

Введение

В настоящее время перспективно развитие бесстыкового пути, т. к. он имеет ряд достоинств по сравнению со стыковым: уменьшение износа ходовой части и самих рельсов; снижение условного сопротивления движению и как следствие – экономия топлива; увеличение сроков службы пути; уменьшение затрат на содержание пути; улучшение условий комфортабельности проезда пассажиров. Для создания бесстыкового пути используется контактная и алюминотермитная сварка. В процессе сварки могут образоваться значительные остаточные напряжения, являющиеся одной из основных причин зарождения и развития трещин [1].

Для определения остаточных напряжений используются рентгеновские, магнитные методы и методы твердости. Они определяют напряжения в тонком поверхностном слое с обязательным учетом большого числа мешающих факторов [2].

Использование ультразвуковых методов оценки остаточных напряжений позволяет существенно повысить точность и измерять внут-

© Казанцев С. В., Булдакова И. В., Понькин М. А., Будрин А. Ю., Волкова Л. В., 2017
Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-12-00010).

ренние и поверхностные напряжения металлоконструкций за счет использования различных типов ультразвуковых волн (УЗ) [3–18]. Применение головной ультразвуковой волны для оценки напряжений металла в подповерхностной зоне (2–8 мм) позволяет существенно повысить чувствительность измерения скоростей волн, которые используются для оценки остаточных напряжений [19].

Целью работы являлась разработка аппаратуры для измерения остаточных напряжений в головке рельса.

Разработка преобразователя головной волны

Возбуждение и прием головной волны осуществлялись с использованием разработаного П-образного раздельно-совмещенного пьезопреобразователя (рис. 1). Для регистрации импульсов использовался ультразвуковой дефектоскоп УД9812 «Уралец».

Для возбуждения требуемого типа волны пьезопреобразователем необходимо рассчитать угол ввода и выбрать базу прозвучивания, обеспечивающую требуемую точность измерения.

Призма преобразователя сделана из акрила. Скорость УЗ продольной волны в акриле рассчитана исходя из скорости волны в СО-1 $C_{l\,\text{СО–1}}$ = (2670 ± 133) м/с, согласно ГОСТ 14782–86:

$$t_1 = \frac{2h_{\text{СО–1}}}{C_{l\,\text{СО–1}}} + t_{\text{П}}, \tag{1}$$

$$t_2 = \frac{2h_{\text{акр}}}{C_{l\,\text{акр}}} + t_{\text{П}}, \tag{2}$$

где $t_1 = 17\cdot10^{-6}$ с , $t_2 = 20{,}62\cdot10^{-6}$ с – время между излучением сигнала и приемом прямым преобразователем в СО-1 и акриле, $h_{\text{СО-1}} = 21{,}6\cdot10^{-3}$ м, $h_{\text{акр}} = 26{,}6\cdot10^{-3}$ мм – путь пройденный волной в СО-1 и акриле, $C_{l\,\text{СО-1}}$, $C_{l\,\text{акр}}$ – скорость продольной УЗ волны в СО-1 и акриле.

Тогда скорость продольной волны в призме преобразователя

$$C_{l\,\text{акр}} = \frac{h_{\text{акр}}}{\left(\dfrac{h_{\text{СО-1}}}{C_{l\,\text{СО–1}}} - \dfrac{t_1 - t_2}{2}\right)}. \tag{3}$$

Зная скорость продлольной волны в призме ($C_{l\,\text{акр}}$ = 2797 м/с), можно рассчитать угол, необходимый для получения головной волны в стали (первый критический):

$$\alpha_{1кр} = \arcsin\left(\frac{C_{l\,акр}}{C_{l\,ст}}\right), \quad (4)$$

где $\alpha_{1кр}$ – первый критический угол; $C_{l\,ст}$ – скорость продольной волны в стали.

Расчитанный угол падения составляет $\alpha_{1кр}$ = 27,78.

База прозвучивания выбрана от 60–70 мм

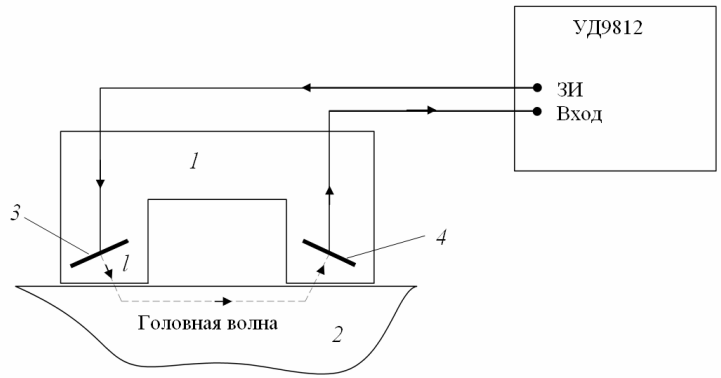


Рис. 1. Схема блока преобразователей головной волы: *1* – призма преобразователя; *2* – исследуемый объект; *3* – возбуждающая пьезопластина; *4* – пьезопластина принимающая головную волну

Методика расчета скорости головной волны

Для обеспечения требуемой точности измерения скорости головной волны (не более 3 м/с) была разработана методика оценки времени распространения волн, использующая разность пиковых занчений импульса на СО-2 и контрольном образце (рис. 2). Точками на рисунке показаны пиковые значения, по которым производились измерения.

Расчет скорости в образце рельса осуществлялся с помощью формулы

$$C_P = \frac{1}{\left(\frac{1}{C_{СО-2}} - \frac{\Delta t_{среднее}}{b}\right)}, \quad (5)$$

где C_P – скорость головной волны в образце; $\Delta t_{среднее}$ – среднее арифметическое разности времен прихода импульса по 6 пиковым значени-

ям; $C_{СО\text{-}2}$ = 5920 м/с – скорость головной волны в стандартном образце СО–2, b = 0,066 м – база преобразователя (расстояние между точкой выхода головной волны и точкой приема).

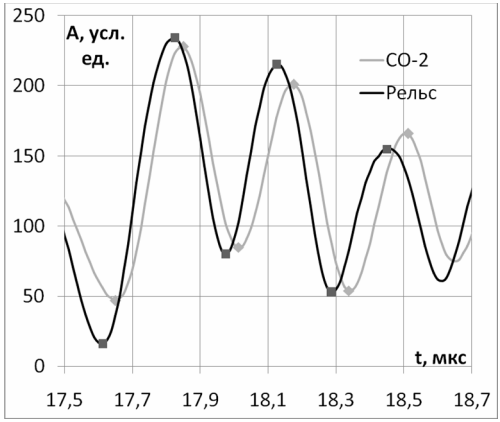


Рис. 2. Принятая головная волна в рельсе и стандартном образце СО-2. Точками на рисунке обозначены пиковые значения, по которым определялась разность времени прихода импульса

Скорость головной волны в рельсах

Разработанная аппаратура и методика измерений была применена на четырех рельсах со сварными соединениями. Параметры отрезков исследуемых рельсов типа Р65, выполненных электроконтактной сваркой, приведены в табл. 1.

Таблица 1. **Параметры рельсов**

Условный номер рельса	Высота рельса, мм	Длина, м	Ширина зоны сплавления, мм	Износ по высоте, мм
1	173–174	0,975	120	5,9–5,6
2	173–175	1,385	260	5,4–6,9
3	177–179	0,80	150	1,1–3,1
4	178	0,81	–	2,0–2,1

На рис. 3–6 представлены результаты измерения скорости головной волны вдоль поверхности катания рельса, штриховыми линиями обозначены зоны сплавления рельсов. Шаг перемещения блока ПЭП 40 мм в зоне без термического влияния, 10 мм – в условной зоне сплавления.

Результат измерений скорости головной волны на поверхности катания рельса № 3 представлен на рис. 4.

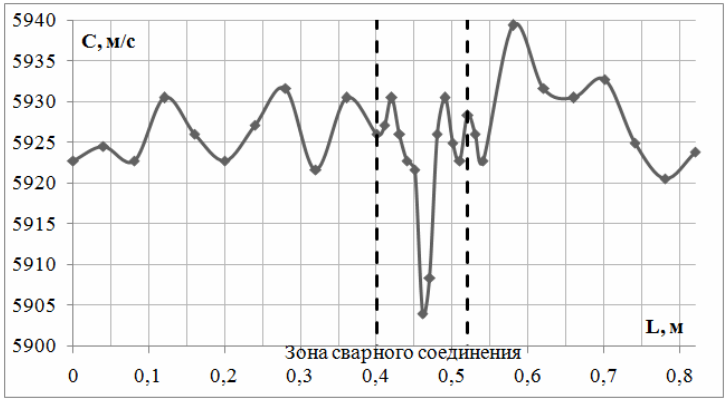


Рис. 3. Скорость головной волны на поверхности катания рельса № 1

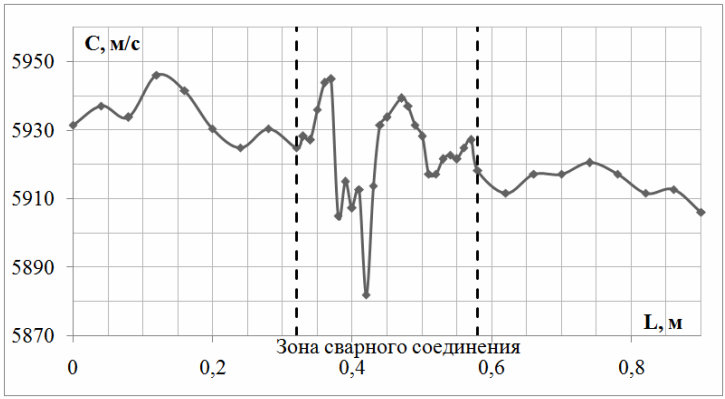


Рис. 4. Скорость головной волны на поверхности катания рельса № 2

Из результатов измерений видно, что скорость головных волн в рельсах на участках без сварных соединений составляет 5910–5930 м/с в зависимости от эксплуатации. В зоне сварного шва скорость головной волны уменьшается на 30–80 м/с, что связано с изменением напряженного состояния в зоне сварного соединения. В рельсе № 4 скорость волны не изменяется, что говорит о высоком качестве электроконтактной сварки или об отсутствии сварного соединения.

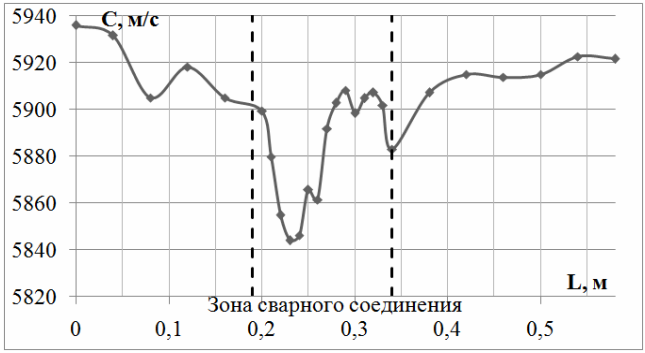


Рис. 5. Скорость головной волны на поверхности катания рельса № 3

Рис. 6. Скорость головной волны на поверхности катания рельса № 4

Выводы

В ходе работы была измерена скорость головной волны в рельсах на поверхности катания в зоне сварного соединения и без сварного соединения. По результатам измерений видно изменение скоростей волн в зоне сварных соединений, что говорит об изменении структуры металла и чувствительности метода для оценки остаточных напряжений в металлоконструкциях.

Список литературы

1. Сварка рельсов // gogaforever.narod.ru/. – URL: http://gogaforever.narod.ru/READY/Data/13-7.htm/ (дата обращения: 13.11.2016).

2. *Николаев, Г. А.* Сварные конструкции : в 2 т. / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. – М. : Высш. шк., 1982. – 272 с. – Т. 2. – 1983. – 344 с.

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. *Недзвецкая*, *О. В.* Фильтрация акустических дефектограмм протяженных объектов с использованием волн с использованием метода обращения свертки сигналов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2006. – № 2. – С. 31–40.

5. *Мурашов*, *С. А* Основные параметры акустического контроля протяженных объектов различного профиля с использованием крутильных волн / С. А. Мурашов, О. В. Коробейникова // Вестник ИжГТУ. – 2010. – № 2. – С. 84–88.

6. *Муравьева*, *О. В.* Моделирование акустических полей синфазных электромагнитно-акустических преобразователей / О. В. Муравьева, А. В. Мышкин // Дефектоскопия. – 2013. – № 12. – С. 69–76.

7. 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.

8. *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.

9. Оценка остаточных напряжений в ободьях вагонных колес электромагнитно-акустическим методом / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Е. Н. Балобанов, Л. В. Волкова // Дефектоскопия. – 2011. – № 8. – С. 16–28.

10. Акустический волноводный контроль элементов глубиннонасосного оборудования / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин, Ю. В. Мышкин // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 9. – С. 110–115.

11. *Муравьева*, *О. В.* Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневого электромагнитно-акустического метода контроля прутков / О. В. Муравьева, М. Ю. Соков // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2016. – № 3(71). – С. 46–50.

12. 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.

13. *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.

14. *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.

15. 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.

16. *Муравьев*, *В. В.* Оценка величины натяга бандажей локомотивных колес методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова // Дефектоскопия. – 2013. – № 9. – С. 40–46.

17. *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.

18. 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.

19. Методы акустического контроля металлов / Н. П. Алешин, В. Е. Белый, А. Х. Вопилкин, А. К. Вощанов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1989. – 456 с.

Research of Creep Wave Spreading in Rails with Butt Weld

The article contains a calculation dual search unit of creep wave: calculation of angle incidence and velocity in the prism, as well as velocity measurement of creep wave in the rail with welded seam when dual search unit are installing on running surface. Velocity of creep wave decreases in the heat-affected area.

Keywords: creep wave; rail; welded seam; ultrasound velocity waves; piezoelectric transducer

УДК 615.84(035)

В. В. Мирошников, доктор технических наук, зав. кафедрой «Приборы»
А. Дия, аспирант
E-mail: dahl.pribory@yandex.ru
Луганский национальный университет имени Владимира Даля

Дистанционный контроль электромагнитных характеристик биологических объектов

Для повседневного исследования биологических объектов или осуществления их мониторинга очень важно выбрать такое физическое воздействие на объект, которое не вызывает побочных эффектов. Поэтому электромагнитное поле, взаимодействующее с биологическим объектом, способно считать информацию о его характеристиках, не причинив объекту повреждения. Достоверность получаемой информации будет зависеть от величины и однородности создаваемого поля в заданном объеме, а учитывая то, что магнитная система располагается за пределами объекта контроля, это довольно сложная техническая задача.

Ключевые слова: биологический объект; магнитная проницаемость; катушка намагничивания; электромагнитное поле; бесконтактный способ

Исследование биологических объектов (БО) бесконтактным способом является перспективным направлением, открывающим новые возможности контроля и обнаружения на ранних стадиях изменений в организме. При этом необходимым условием является безопасность применяемого метода контроля. Таким физическим воздействием, позволяющим получать информацию о биологическом объекте без причинения ему вреда, являтся слабое электромагнитное поле. Учитывая, что любой биологический объект – это структурно неоднородный электропроводящий объект, любое изменение его физических параметров связано с изменением магнитных, электрических свойств отдельных элементов объекта, вызванных как внешним воздействием, так и внутренними изменениями.

В связи с вышеизложенным очень важно научиться создавать требуемую конфигурацию и величину электромагнитного поля в заданном объеме, находящемся на некотором расстоянии от самого источника поля.

На примере синтеза магнитного поля покажем, как можно рассчитывать намагничивающие системы, позволяющие за пределами самой

© Мирошников В. В., Дия А., 2017

системы создавать заданное магнитное поле с требуемой однородностью. Как допущение примем, что в области создания магнитного поля находится объект с заданной магнитной проницаемостью.

Постановка задачи по расчету системы намагничивающих катушек формулируется так (рис. 1, *а*, *б*). Необходимо в области $V_м$ создать однородное магнитное поле, вектор напряженности которого $\overline{H}_0 = \text{const}$ во всех точках $Q \in V_м$.

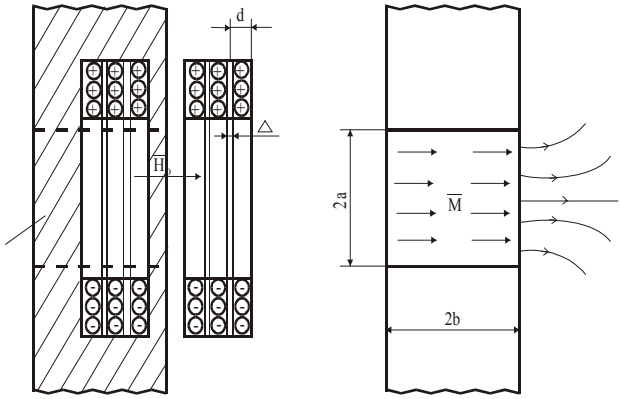


Рис. 1. Общий вид синтезируемой катушки:
а – катушка у поверхности БО; *б* – намагниченный участок БО

Катушка намагничивания содержит три секции с различным значением тока в каждой секции. Таким образом, в объеме $V_м$, имеющем форму параллелепипеда с размерами вдоль осей *x*, *y*, *z* соответственно 2*a*, 2*b*, 2*c* (рис. 2), 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.

Будем создавать это поле с помощью катушки, представляющей собой совокупность *N* бесконечно тонких катушек [1], витки которых имеют прямоугольную форму и лежат в плоскостях, параллельных плоскости *x*0*z* (рис. 2).

Толщины секций катушек и зазоры между ними обозначены соответственно через $d_j \left(j = \overline{1, N} \right)$ и $\Delta_j \left(j = \overline{1, N-1} \right)$, , причем $d_j > 0$; $\Delta_j \geq 0$. На рис. 2 изображен случай, когда d_j и Δ_j одинаковы. Все тонкие катушки изготовлены из провода одного и того же сечения. Искомым будет число витков тонких катушек W_1, W_2, .., W_N.

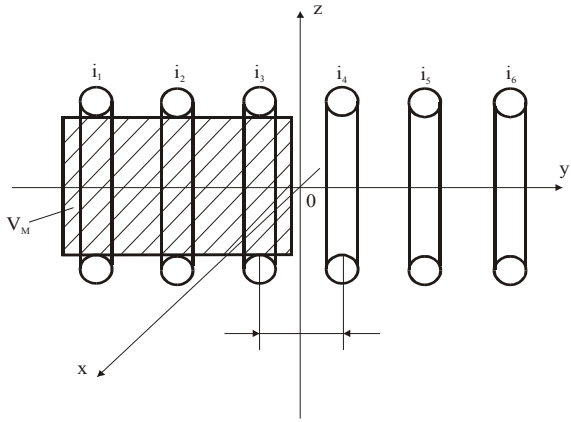


Рис. 2. Замена секций катушки бесконечно тонкими проводниками

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. Очевидно, что

$$y_j = -b + \frac{d}{2} + (d + \Delta)(j - 1);\ \ j = \overline{1, N}. \tag{1}$$

Согласно формуле Био-Савара – Лапласа, можно найти индукцию единичного тока j-го витка в объеме $V_м$. Она будет равна

$$\begin{aligned}\overline{B}_j^{(1)}(x,y,z) = \frac{\mu_0}{4\pi}\Bigg[&\frac{Y_j}{x_{j-}^{(1)2} + Y_j^2}\left(\frac{z_{j+}^{(1)}}{r_{3j}^{(1)}} - \frac{z_{j-}^{(1)}}{r_{2j}^{(1)}}\right) - \frac{Y_j}{x_{j+}^{(1)2} + Y_j^2}\left(\frac{2_{j+}^{(1)}}{r_{4j}^{(1)}} - \frac{z_{j-}^{(1)}}{r_{1j}^{(1)}}\right)\Bigg]\bar{1}_\alpha + \\ &+\Bigg[\frac{z_{j-}^{(1)}}{Y_j^2 + z_{j-}^{(1)2}} \times \left(\frac{x_{j-}^{(1)}}{r_{2j}^{(1)}} - \frac{x_{j+}^{(1)}}{r_{1j}^{(1)}}\right) + \frac{x_{j-}^{(1)}}{x_{j-}^{(1)2} + Y_j^2} \times \left(\frac{z_{j-}^{(1)}}{r_{2j}^{(1)}} - \frac{z_{j+}^{(1)}}{r_{3j}^{(1)}}\right) + \\ &+\frac{z_{j+}}{Y_j^2 + z_{j+}^{(1)2}}\left(\frac{x_{j+}^{(1)}}{r_{4j}^{(1)}} - \frac{x_{j-}^{(1)}}{r_{2j}^{(1)}}\right) + \frac{x_{j+}^{(1)}}{x_{j+}^{(1)2} + Y_j^2} \times \left(\frac{z_{j+}^{(1)}}{r_{4j}^{(1)}} - \frac{z_{j-}^{(1)}}{r_{1j}^{(1)}}\right)\Bigg]\bar{1}_y + \\ &+\Bigg[\frac{Y_j}{Y_j^2 + z_{j-}^{(1)2}}\left(\frac{x_{j+}^{(1)}}{r_{1j}^{(1)}} - \frac{x_{j-}^{(1)}}{r_{2j}^{(1)}}\right) + \frac{Y_j}{Y_j^2 + z_{j+}^{(1)2}} \times \left(\frac{x_{j-}^{(1)}}{r_{3j}^{(1)}} - \frac{x_{j+}^{(1)}}{r_{4j}^{(1)}}\right)\Bigg]\bar{1}_z,\end{aligned} \tag{2}$$

где $x + a_j^{(1)} = x_{j+}^{(1)},\ x - a_j^{(1)} = x_{j-}^{(1)},\ y - y_j = Y_j,\ z + c_j^{(1)} = z_{j+}^{(1)}, z - c_j^{(1)} = z_{j-}^{(1)};$

$$r_{1j}^{(1)} = \sqrt{x_{j+}^{(1)2} + Y_j^2 + z_{j-}^{(1)2}}, \quad r_{2j}^{(1)} = \sqrt{x_{j-}^{(1)2} + Y_j^2 + z_{j-}^{(1)2}},$$
$$r_{3j}^{(1)} = \sqrt{x_{j-}^{(1)2} + Y_j^2 + z_{j+}^{(1)2}}, \quad r_{4j}^{(1)} = \sqrt{x_{j+}^{(1)2} + Y_j^2 + z_{j+}^{(1)2}}. \tag{3}$$

В формулах (3) и далее через x, y, z обозначены точки наблюдения поля в объеме V_m.

Будем искать точки $i_j^{|1|}\left(j = \overline{1,w}\right)$ из условия [2]

$$\left\| \overline{B}(x,y,z) - \sum_{j=1}^{N} i_j^{(1)} B_j^{(1)}(x,y,z) \right\| = \min. \tag{4}$$

Задача (4) сводится источником [3] к заведомо совместной системе линейных алгебраических уравнений

$$\sum_{j=1}^{N} \left(\overline{\mathrm{B}}_j^{(1)}, \overline{\mathrm{B}}_k^{(1)} \right) i_j^{(1)} = \left(\overline{\mathrm{B}}, \overline{\mathrm{B}}_k^{(1)} \right), \ k = \overline{1,w}. \tag{5}$$

Решением системы (5) будет совокупность токов $i_1^{(1)}, i_2^{(1)} \ldots i_N^{(1)}$. После этого находится магнитное поле этих токов $\mathrm{B}_N^{(1)2}(x,y,z)$ и погрешность $\eta_N^{(1)} = \left\| \overline{B} - \overline{B}_N^{(1)} \right\| \Big/ \left\| \overline{B} \right\|$.

Система линейных уравнений образуется из определения скалярного произведения в Гимбертовом пространстве

$$\left(\overline{\upsilon} \cdot \overline{u} \right) = \int_{V_м} \overline{\upsilon}(x,y,z) u(x,y,z) dV. \tag{6}$$

Далее по найденным значениям токов определяется первое приближение совокупности тонких катушек, т. е. найденные токи распределяются по сечениям тонких катушек с учетом коэффициентов заполнения. В результате находятся размеры катушек в первом приближении, т. е. $h_1^{(1)}, h_2^{(1)} \ldots h_N^{(1)}$.

Направления плотности тока в тонких катушках (для первого приближения) определяются знаками токов $i_j^{(1)}$. Если $i_j^{(1)} > 0$, то плотность тока в верхнем сечении j-й тонкой катушки направлена вдоль оси x, если же $i_j^{(1)} < 0$, то против оси x.

Найдя параметры первого приближения совокупности тонких катушек, необходимо найти поле в объеме V_c, создаваемое этими катушками $\mathrm{B}^{(1)}(x, y, z)$ по формулам (6) [4], и погрешность $\eta^{(1)} = \left\| \overline{B} - \overline{B}^{(1)} \right\| \Big/ \left\| \overline{B} \right\|$. 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 (размер $h_j^{(1)}$ увеличивается, если токи $i_j^{(1)}$ и $i_j^{(2)}$ одного знака, и уменьшаются в противном случае). Сечение тонких катушек выбирается из допустимой относительно нагрева плотности тока. Итерационный процесс прекращается после n-го шага, когда наступает приближенное равенство $\eta^{(n)} = \eta_N^{(n)}$.

В рассматриваемом случае толщиной контролируемого объема биологического объекта является величина $2b_{\text{м}}$, а объем $V_{\text{м}} = 2a_{\text{м}} \cdot 2c_{\text{м}} \cdot 2b_{\text{м}}$. В шести точках рис. 3 задается одна составляющая индукции магнитного поля $\overline{\mathrm{B}} = \overline{1}_y \mathrm{B}_0$, тогда система уравнений запишется так:

$$\begin{bmatrix} \mathrm{B}_{1y}^{(1)} \cdot \mathrm{B}_{1y}^{(1)} & \mathrm{B}_{2y}^{(1)} \cdot \mathrm{B}_{1y}^{(1)} & \mathrm{B}_{3y}^{(1)} \cdot \mathrm{B}_{1y}^{(1)} & \mathrm{B}_{4y}^{(1)} \cdot \mathrm{B}_{1y}^{(1)} & \mathrm{B}_{5y}^{(1)} \cdot \mathrm{B}_{1y}^{(1)} & \mathrm{B}_{6y}^{(1)} \cdot \mathrm{B}_{1y}^{(1)} \\ \mathrm{B}_{1y}^{(1)} \cdot \mathrm{B}_{2y}^{(1)} & \mathrm{B}_{2y}^{(1)} \cdot \mathrm{B}_{2y}^{(1)} & \mathrm{B}_{3y}^{(1)} \cdot \mathrm{B}_{2y}^{(1)} & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & & & & & \\ \vdots & & & & & \\ \vdots & & & & & \\ \mathrm{B}_{1y}^{(1)} \cdot \mathrm{B}_{6y}^{(1)} & \mathrm{B}_{2y}^{(1)} \cdot \mathrm{B}_{6y}^{(1)} & \mathrm{B}_{3y}^{(1)} \cdot \mathrm{B}_{6y}^{(1)} & \mathrm{B}_{4y}^{(1)} \cdot \mathrm{B}_{6y}^{(1)} & \mathrm{B}_{5y}^{(1)} \cdot \mathrm{B}_{6y}^{(1)} & \mathrm{B}_{6y}^{(1)} \cdot \mathrm{B}_{6y}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ i_6 \end{bmatrix} = \tag{7}$$

$$= \begin{bmatrix} \mathrm{B}_{1y} \cdot \mathrm{B}_0 \\ \mathrm{B}_{2y} \cdot \mathrm{B}_0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \mathrm{B}_{6y} \cdot \mathrm{B}_0 \end{bmatrix}.$$

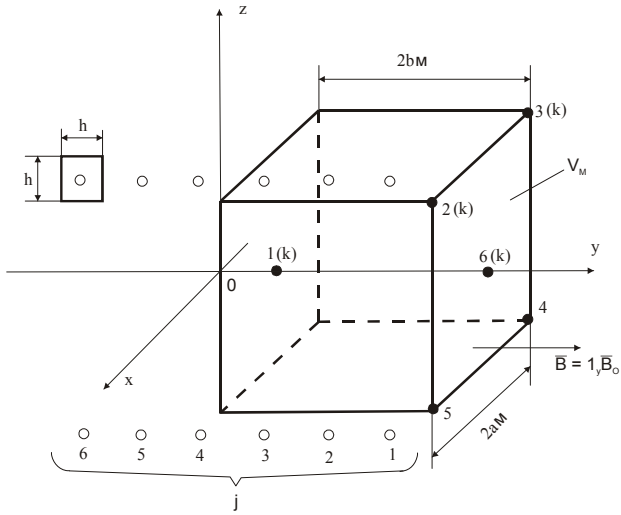


Рис. 3. К составлению системы линейных уравнений

По предложенной методике был приведен расчет систем катушек намагничивания со следующими параметрами: h = 0,025 м, $a = b$ = 0,1 м, b = 0,09 м. В объеме $0,03 \times 0,07 \times 0,065$ м^3 синтезировалось однородное магнитное поле с вектором индукции B = 0,1 Тл. Получены следующие значения токов $i_1 = 3.2 \cdot 10^3$ А; $i_2 = 4.2 \cdot 10^3$ А; $i_3 = 5.4 \cdot 10^3$ А. Погрешность расчета не превышала $\eta = 6$ %.

Список литературы

1. *Пономарев, Ю. Ф.* Исследование электромагнитных явлений в магнитных модуляторах : дис. … канд. физ.-мат. наук. – Свердловск, 1966. – 180 с.

2. *Загидулин, Р. В.* Магнитное поле поверхностного дефекта в ферромагнитной пластине / Р. В. Загидулин, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1991. – № 8. – С. 33–39.

3. *Бамс, К.* Анализ и расчет электрических и магнитных полей / К. Бамс, П. Лауренс. – М. : Энергия, 1970. – 83 с.

4. *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.

Distant Testing of Electromagnetic Characteristics Of Biological Objects

For a daily research of biological objects or implementation of their monitoring it is very important to select physical impact on an object which doesn't cause side *effects. Therefore, the electromagnetic field which interacts with a biological object is capable to read information on its characteristics without damage of an object. Reliability of the obtained information will depend on value and homogeneity of the created field in the given volume. Taking into account that the magnetic system is located outside of checking object, it is quite complex technical problem.*

Keywords: biological object; magnetic conductivity; magnetization coil; electromagnetic field; noncontact method

УДК 620.179.14

В. В. Мирошников, доктор технических наук, зав. кафедрой «Приборы»
Т. В. Петрущенко, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Информатика и программная инженерия»
E-mail: dahl.pribory@yandex.ru
Луганский национальный университет имени Владимира Даля

Контроль динамики развития дефекта действующих промышленных объектов

Развитие дефекта может быть определено установкой стационарного датчика на промышленный объект, который с заданной периодичностью проверяет состояние контролируемого материала, а в случае необходимости (наличие дефекта) изменяет частоту опроса чувствительных элементов датчика.

Ключевые слова: дефект; интеллектуальный датчик; феррозонд; матричный преобразователь; *PIC*-контроллер

Датчик должен обеспечивать достаточно большую поверхность контроля без механического перемещения, устойчивость к внешним факторам, особенно к температуре, иметь автономное питание и, следовательно, малое энергопотребление, корректировку функции преобразования с учетом температурной и временной нестабильности, обработку, хранение и передачу больших объемов данных; минимальные габариты и вес; низкую стоимость [1].

Все это возможно на базе интеллектуальных датчиков (ИД). Основным элементом ИД остается первичный преобразователь. В качестве такого предлагается магниточувствительный элемент (МЧЭ) с импульсным возбуждением. По сути это полуэлемент феррозонда [2], содержащий сердечник из аморфного металла и две обмотки, возбуждения и выходную. Такая конструкция МЧЭ обладает высокой чувствительностью, помехоустойчивостью [3, 4], а благодаря импульсному возбуждению МЧЭ легко набирается в матричный преобразователь с поэлементным опросом и минимумом потребляемой мощности. Магниточувствительный элемент измеряет магнитное поле на поверхности стенки объекта, которое создается постоянными магнитами, выполняющими одновременно и роль магнитных присосок, удерживающих датчик на стенке. Материал постоянных магнитов – самарий-кобальто-

© Мирошников В. В., Петрущенко Т. В., 2017

вый, обладающий высокой временной и температурной стабильностью.

Создание мониторинговой системы предполагает сбор, предварительную обработку, хранение и передачу информации *in situ* (т. е. «по месту»).

Реализация режима *in situ* осуществляется на базе *PIC*-контроллера, который управляет работой всеми элементами датчика, осуществляет обработку и хранение получаемой информации, а также «пакует» ее и подготавливает к передаче (рис. 1) [5].

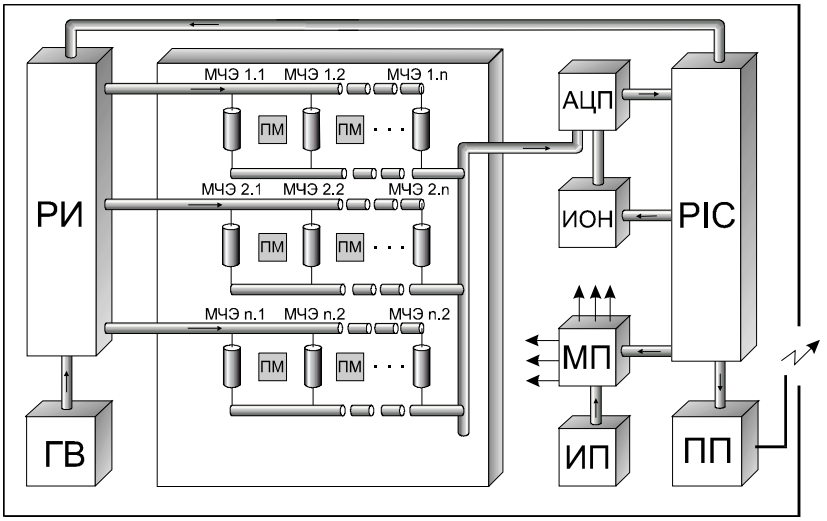


Рис. 1. Структурная схема магнитного интеллектуального датчика: ГВ –- генератор возбуждения; РИ – распределитель импульсов возбуждения; ПМ – постоянные магниты; МЧЭ1.1 – МЧЭn.n. – магниточувствительные элементы; АЦП – быстродействующий аналого-цифровой преобразователь; ИОН – источник опорного напряжения типа XFETTM; МП – менеджер питания; ИП – источник питания, литиевая батарея; ПП – приемопередатчик; *PIC* – контроллер

Выходной сигнал с МЧЭ через быстродействующий аналого-цифровой преобразователь с автоматическим выбором диапазона входного напряжения поступает в *PIC*-контроллер, где после необходимой обработки подается на цифровой приемопередатчик, который обеспечивает полудуплексный режим связи датчика с базовым компьютером.

Базовый компьютер через радиомодем организует связь с любым количеством ИД и осуществляет окончательную обработку получен-

ной информации и ее архивирование. Особое внимание при построении ИД уделено минимизации энергопотребления, которая достигается выбором элементной базы с малым энергопотреблением, введением в функцию *PIC*-контроллера режима менеджера питания, в задачу которого входит приостановка или полное отключение питания от элементов, не используемых в данный момент. Выбор оптимальной тактовой частоты контроллера в зависимости от числа МЧЭ также позволяет снизить энергопотребление. Выполнение всех этих требований обеспечивает автономную работу ИД от литиевой батареи на протяжении 12–15 месяцев, что вполне приемлемо с точки зрения их обслуживания.

Перед установкой ИД на работающий объект в месте его установки приставным коэрцитиметром определяются основные магнитные характеристики стенки объекта, это остаточная индукция Br, коэрцитивная сила Hc, и по ним рассчитывается магнитная проницаемость μr.

Эти данные заносятся в базовый компьютер и служат начальными данными для последующих вычислений.

Для получения аналитических зависимостей материал, из которого изготовлен объект контроля, проходит испытание в лабораторных условиях. Образование микротрещины приводит к резкому в 1,5–5 раз увеличению в области микротрещины, напряженности поля рассеяния, в то время как состав и твердость материала изменяются плавно с течением времени. Причем предпосылкой к появлению микротрещины является обезуглероживание материала, что видно при непрерывном мониторинге, и это дает возможность прогнозировать появление и следить за динамикой развития микротрещин. Полученные лабораторные результаты являются критерием, позволяющим правильно оценивать происходящие в металле объекта процессы и принять решение о надежности объекта контроля.

Базовый компьютер осуществляет также корректировку функции преобразования МЧЭ, которая необходима в силу временных температурных изменений магнитных характеристик сердечника МЧЭ. Поправочные коэффициенты вычисляются в зависимости от температуры и степени старения материала сердечника. Одновременно с определением поправочных коэффициентов к МЧЭ базовый компьютер осуществляет тестирование работоспособности самого ИД. В процессе тестирования на вход АЦП подается образцовый сигнал от встроенного дополнительного источника типа XFET^{TM}, который обладает высокой температурной и временной ($2 \cdot 10^{-7}$ В/1000 ч) стабильностью в диапазоне температур от –40 до 125 ºС. Тестирование

осуществляется в автоматическом или ручном режиме для проверки канала обработки информации и подтверждения достоверности получаемой информации.

Важным вопросом при проектировании систем долговременного мониторинга является надежность информационно-вычислительных систем, расчет которой осуществляется по данным о надежности составляющих ее блоков. Каждый блок, а это ИД, представляет собой сложную, многоэлементную информационно-измерительную систему. В соответствии с методикой научно-исследовательского института электронного приборостроения [6] расчет вероятности безотказной работы ИД выполнен методом статистического моделирования. Надежность вычислялась за 1000 ч, а отказ ИД определялся как прохождение менее 90 % сигналов при тестировании ИД. Полученная доверительная вероятность безотказной работы ИД составила 0,98, а с учетом точности самого метода статистического моделирования реальная вероятность безотказной работы ИД равна 0,99, с матрицей 20 × 20 МЧЭ, что соответствует площади контроля 100 $см^2$.

Конструктивно ИД выполнен в герметичном прямоугольном корпусе (рис. 2) из металла 12Х18Н10ТС с внутренним пермаллоевым экраном. Для крепления на поверхности стенки объекта контроля к углам электронного блока *1* ИД приварены ребра жесткости *2*, на концах которых имеются магнито-пружинные прижимы (рис. 4). Постоянный магнит прижима, выполненный из сплава ниобий – железо – бор, имеет возможность перемещаться в корпусе, тем самым устанавливая и удерживая электронный блок перпендикулярно поверхности стенки объекта контроля.

Внутри электронного блока расположены платы с феррозондами (рис. 3) с электронными компонентами (рис. 5) микропроцессорной схемы обработки выходного сигнала и литиевый аккумулятор.

Плата с феррозондовыми преобразователями выполнена из стеклотекстолита толщиной 30 мм, по ее торцу расположена обмотка подмагничивания *7* (рис. 3). По диагоналям платы располагаются феррозонды *3*, выводы которых через контактные площадки *4* подсоединены к разъемам: возбуждения *2* и выходного сигнала *5*. Разнесение шин возбуждения и выходного сигнала феррозонда позволило исключить их взаимное влияние друг на друга.

Все внутренние элементы электронного блока покрыты силиконовым лаком SCC3, а блок собран с применением силиконового герметика, что обеспечивает влагозащиту и температурную стабильность всех элементов конструкции.

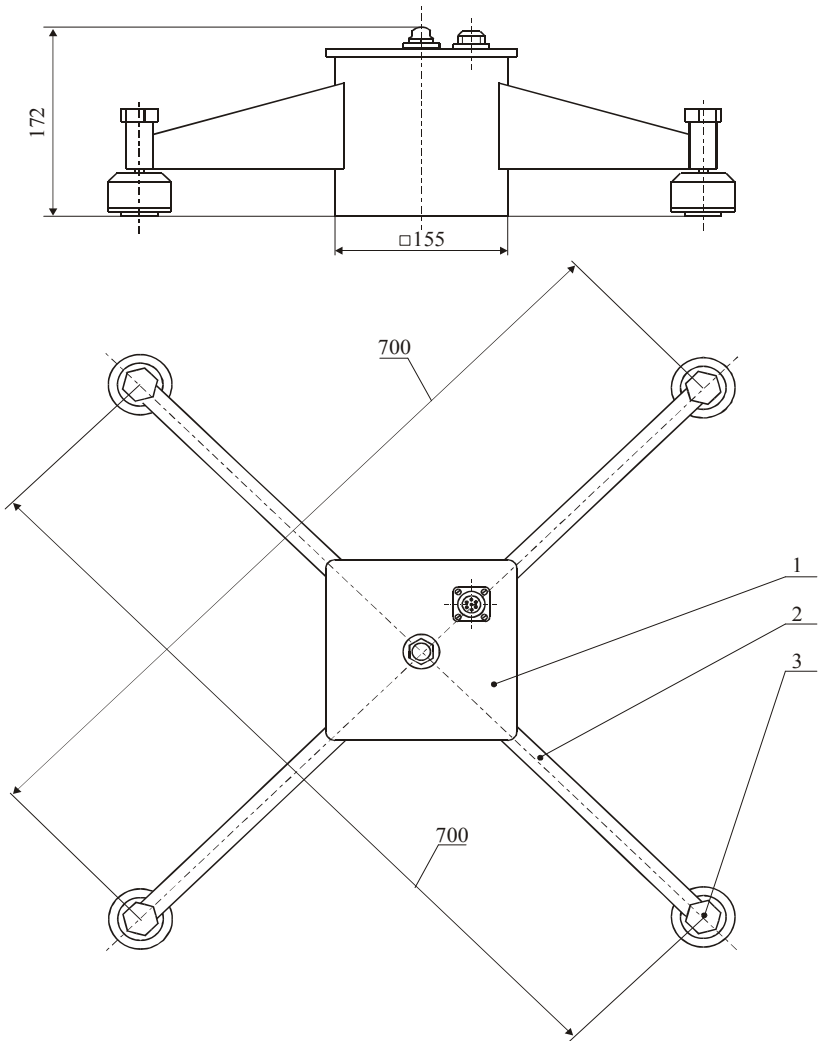


Рис. 2. Общий вид магнитного датчика для установки на промышленных объектах: *1* – электронный блок; *2* – ребро жесткости; *3* – прижим магнито-пружинный самоустанавливающийся

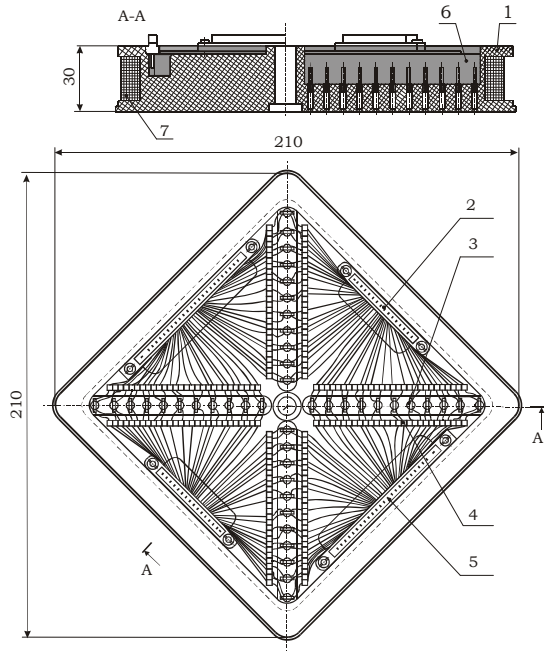


Рис. 3. Плита датчиков: *1* – основание (стеклотекстолит); *2* – разъем возбуждения; *3* – феррозонд; *4* – площадка контактная; *5* – разъем выходных сигналов; *6* –компаунд; 7 – обмотка

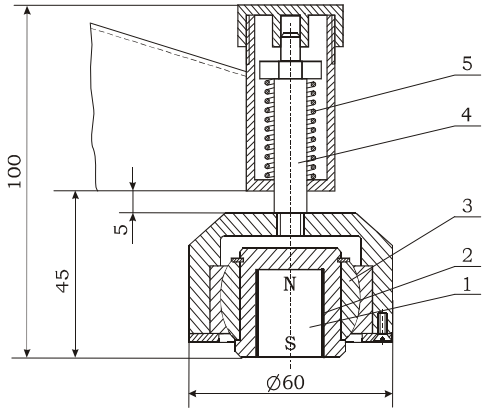


Рис. 4. Прижим магнито-пружинный самоустанавливающийся:
1 – постоянный магнит; *2* – компаунд; *3* – обойма; *4* – шток; *5* – пружина

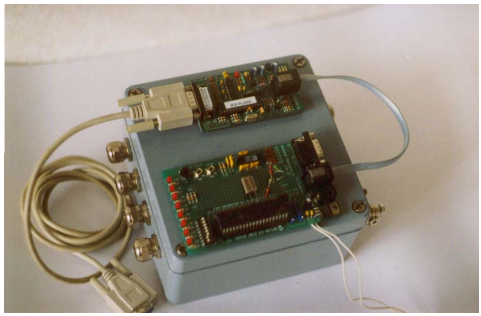


Рис. 5. Общий вид микропроцессорной платы прибора магнитного контроля

Список литературы

1. *Мирошников*, *В. В.* Довгостроковий магнітний моніторинг техногенно небезпечних конструкцій // Методи та прилади контролю якості. – 2000. – № 5. – С. 41–44.

2. *Мирошников*, *В. В.* Проектирование дифференциального феррозонда / В. В. Мирошников, А. И. Шевченко // Вісник Східноукраїнського державного університету. – 1997. – № 4(8). – С. 135–140.

3. *Мирошников*, *В. В.* Теория матричного магниточувствительного датчика на основе феррозондов // Вісник Східноукраїнського національного університету. – 2000. – № 3. – С. 197–202.

4. *Мирошников*, *В. В.* Матричный феррозондовый преобразователь / В. В. Мирошников, А. В. Романенко, С. Н. Швец // Неразрушающий контроль и диагностика : материалы XVI Рос. науч.-техн. конф. – СПб.,2002. – 1 с.

5. *Мирошников*, *В. В.* Магнитный контроль водородосодержащих конструкций / В. В. Мирошников, М. В. Бриченко, С. Н. Швец // Водородная обработка материалов : тр. Третьей Междунар. конф. (ВОМ – 2001). – Донецк : ДонНТУ, 2001. – 2 с.

6. *Абрамов*, *А. И.* Автоматизированная система расчетов показателей надежности электроизмерительной аппаратуры / А. И. Абрамов, Н. И. Гордийчук, Ю. Т. Ковальшин // Автоматизация производства и управления в электроприборостроении : тр. ВНИИЭП. – 1984. – № 64. – С. 7–12.

Testing of Defect Propagation Dynamic of Operating Industrial Facility

Propagation of defect can be defined by installation of the stationary sensor on an industrial facility. It with the given periodicity checks a status of controlled material, and in case of need (presence of defect) changes the frequency of inquiry of the sensor sensitive elements.

Keywords: defect; intellectual sensor; ferroprobe; matrix transformer; PIC-controller

УДК 620.179

В. В. Мирошников, доктор технических наук, зав. кафедрой «Приборы»
С. Н. Швец, кандидат технических наук, докторант
E-mail: dahl.pribory@yandex.ru
Луганский национальный университет имени Владимира Даля

Визуализация дефектов при трубной дефектоскопии

Предлагается устанавливать группы датчиков так, чтобы определить геометрические размеры дефекта (начало-конец дефекта, его глубину). Датчик построен в виде многоэлементного преобразователя, в качестве магниточувствительного элемента которого используется феррозонд с импульсным возбуждением.

Ключевые слова: дефект; многоэлементный преобразователь; феррозонд; импульсное возбуждение; поле рассеяния

При создании многоэлементного магнитного преобразователя необходимо выполнить условие, при котором собственное поле соседних магниточувствительных элементов не влияло бы друг на друга. Одновременно с этим магниточувствительный элемент должен обладать высокой чувствительностью и помехоустойчивостью. Оптимальным вариантом устранения взаимного влияния магниточувствительных элементов друг на друга является поочередная подача на них напряжения питания.

С этих точек зрения наиболее подходящим для матричного преобразователя магниточувствительным элементом является феррозонд с форсированным импульсным возбуждением (ФИВ), работающий по схеме градиентомера. Расстояние l между полуэлементами двух соседних феррозондов определяем по формуле

$$l = 2\sqrt{\frac{-B + \sqrt{B^2 + 12C}}{6}}, \qquad (1)$$

где $B = \delta^2 - 2b^2 + (\delta + h)^2$; $C = (b^2 + \delta^2)[b^2 + (\delta + h)^2]$; δ – расстояние от полуэлементов до контролируемой поверхности; h и b – соответственно глубина и полуширина минимального из подлежащих обнаружению дефектов.

© Мирошников В. В., Швец С. Н., 2017

Полуэлементы феррозонда смещены друг относительно друга на угол 45°, а оптимальное расстояние между полуэлементами феррозондов равно 2,83·*l* (рис. 1).

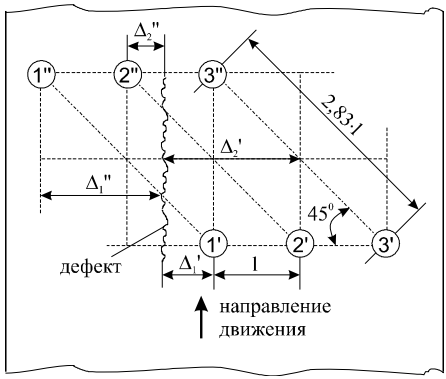


Рис. 1. Расположение полуэлементов феррозондов над контролируемой поверхностью

При таком расположении полуэлементов обеспечено выявление даже самого «сложного» случая расположения дефекта, т. е. дефект расположен строго по направлению движения объекта контроля и между полуэлементами феррозонда. При таком расположении дефекта его магнитное поле рассеяния легко измеряется первым и вторым феррозондами, т. к. расстояние до дефекта $\Delta_1' > \Delta_1''$, а $\Delta_2' > \Delta_2''$. Расстояние от полуэлементов до контролируемой поверхности определяется исходя из величины поля рассеяния дефекта и чувствительности феррозонда [1].

Как отмечалось в работах [2, 3], при контроле в слабом магнитном поле H_0 = 500...3000 А/м поле дефекта практически не зависит от ширины раскрытия дефекта (рис. 2). Топография поля дефекта в таких полях не зависит от формы дефекта, и оно симметрично относительно дефекта.

Работа в слабом магнитном поле несколько изменяет реальную картину поля дефекта, однако такое допущение правомерно, т. к. движение контролируемого объекта неизбежно вносит искажения в топографию магнитного поля дефекта и усложняет его идентификацию.

Максимум поля рассеяния имеет место на оси дефекта, и для слабых магнитных полей можно воспользоваться упрощенной формулой из источника [4].

$$H_{x\max} = \frac{l}{2\pi} H_0 \frac{h^2}{\delta(\delta + h)}. \quad (2)$$

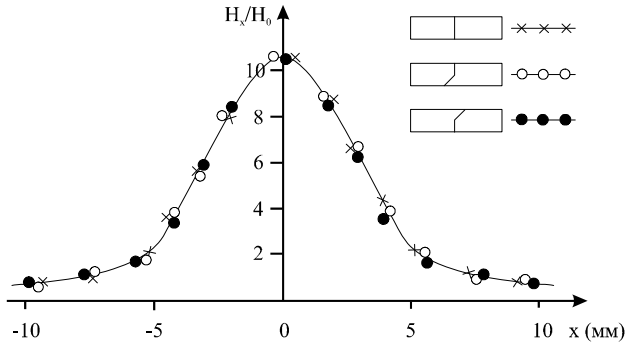


Рис. 2. Зависимость *Hx*(*x*) для трех моделей дефектов (δ = 4; 2*b* = 0,2 мм) в намагничивающем поле *H*0 = 1000 А/м

Рекомендуемое расстояние δ = 2 – 3 мм, при этом поле рассеяния дефекта составляет $H_{\max}$ = 70 – 160 А/м, что вполне достаточно для его однозначного измерения феррозондом с ФИВ. Уменьшение расстояния от полуэлементов до контролируемой поверхности нецелесообразно по двум причинам. Одна из них биение объекта контроля в процессе движения. Другая причина заключается в том, что феррозонд работает без обратной связи по полю, которая обеспечивает линейность измерения поля в широком диапазоне.

Минимальный период опроса феррозонда:

$$T_{\text{опр}} = \frac{l - d_n}{V}, \quad (3)$$

где d_n – диаметр полуэлемента феррозонда; V – скорость движения объекта контроля.

При возбуждении феррозонда однополярными импульсами длительностью t_u и с учетом времени задержки $t_з$ между импульсами максимальное число опрашиваемых феррозондов за время $T_{\text{опр}}$ будет равно

$$N = \frac{T_{\text{опр}}}{t_u + t_з}. \quad (4)$$

Задержка времени между импульсами возбуждения необходима для полного завершения переходных процессов в феррозонде, и чтобы эти

процессы не оказывали влияния на соседний работающий феррозонд. Если максимальная длительность импульса возбуждения t_u = 1 мкс, времени задержки $t_з$ = 0,3 мкс, а скорость движения объекта контроля 5 м/с, то возможно опросить без потери информации 500 феррозондов, что достаточно для контроля трубы диаметром до 730 мм. При увеличении числа феррозондов и для сохранения времени опроса феррозонды целесообразно объединять в группы [1].

Многоэлементные феррозондовые дефектоскопы по способу размещения МЧЭ (магниточувствительного элемента) можно разделить на три группы: это линейные, матричные и матрично-пространственные. К линейным относятся дефектоскопы, в которых феррозонды располагаются в двух или более столбцах. Число строк во много раз превышает число столбцов (рис. 3) и все феррозонды перпендикулярно расположены к поверхности контроля [5].

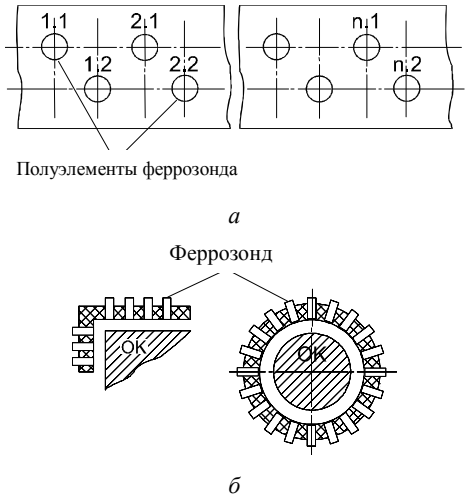


Рис. 3. Линейный феррозондовый преобразователь (*а*)
и способы его размещения относительно объекта контроля (*б*)

При этом форма основания, на котором закреплены феррозонды, зависит от формы контролируемого изделия. С помощью линейных дефектоскопов удобно контролировать различные протяженные объекты: тела вращения, лист, прокат, трубы и т. д., что позволяет исключить одно из направлений перемещения преобразователя или объекта контроля.

Предложенный принцип построения феррозондовых дефектоскопов был опробирован на Молодечненском заводе легких металлоконструкций (Республика Беларусь) для контроля труб диаметром 76–219 мм. Визуализация сигналов от дефектов на этом этапе работ проводилась с помощью осциллографа, укомплектованного дополнительным ОЗУ, объем которого позволял записывать информацию, получаемую в течение 5 минут.

Дефектоскопы с линейными преобразователями легко встраиваются в поток стана и с высокой степенью точности регистрируют место расположения дефекта, при этом они практически нечувствительны к биению, если оно не превышает 3–5 мм в месте размещения преобразователя при скорости движения объекта контроля до 10 м/с [6].

Матричные дефектоскопы имеют преобразователь, который состоит из приблизительно равного числа столбцов и строк феррозондов, которые расположены в одной плоскости. Матричные дефектоскопы позволяют определять не только место расположения дефекта, но и определять длинну и величину раскрытия дефекта.

В матрично-пространственном феррозондовом дефектоскопе феррозонды расположены в двух плоскостях, что позволяет одновременно измерять нормальную и тангенциальную составляющие поля рассеяния дефекта.

Значения составляющих поля рассеяния дефекта являются выходными данными для математической модели дефекта.

В результате расчета по разработанным моделям определяются основные параметры дефекта, причем дефекты выявляются даже на неподготовленной поверхности типа сварного шва. Это достигается благодаря наличию базы данных о форме сигнала от дефекта и измерению второй производной градиента, нормальной составляющей поля дефекта. Такая обработка выходных сигналов преобразователей требует использования персонального компьютера (ПК), что на современном этапе развития целиком оправдано и экономически целесообразно.

Существенной особенностью матричных и матрично-пространственных дефектоскопов, которые имеют ПК, является то, что их преобразователи могут стационарно устанавливаться в наиболее нагруженных и небезопасных местах конструкций на долгий срок. Тем самым удается постоянно контролировать состояние объекта, а при наличии дефекта следить за динамикой его развития и обоснованно прогнозировать оставшийся ресурс работы объекта. Поскольку в феррозонде, кроме сердечника из аморфного металла и обмотки, нет других компонентов, то его долговечность не вызывает сомнений, а влияние внешних факторов на функцию преобразования феррозонда компенсирует-

ся при проведении периодической автоматической калибровки, результаты которой заносятся в память ПК и входят как поправочные коэффициенты в функцию преобразования феррозонда.

Список литературы

1. *Мирошников*, *В. В.* Феррозондовый матричный преобразователь для контроля протяженных цилиндрических изделий // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1999. – № 4. – С. 41–44.

2. *Мужицкий*, *В. Ф.* К расчету магнитостатических полей рассеяния от поверхностных дефектов конечной глубины // Дефектоскопия. – 1982. – № 8. – С. 8–13.

3. *Мирошников*, *В. В.* Размагничивание и контроль остаточной намагниченности деталей из инструментальной стали // Вісник Східноукраїнського державного університету. – 1997. – № 1(5). – С. 240–243.

4. *Мужицкий*, *В. Ф.* К расчету магнитостатических полей рассеяния // Дефектоскопия. – 1987. – № 7. – С. 8–13.

5. *Мирошников*, *В. В.* Багатоелементні ферозондові дефектоскопи як ефективний метод неруйнівного магнітного контролю // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – № 4. – С. 52–54.

6. *Мирошников*, *В. В.* Автоматизированная система управления режимом сварки труб // Наукові праці Донецького державного техничного університету. – Донецьк : Вид-во ДонДТУ, 1999. – С. 203–209.

Visualization of Defects at Pipe Defectoscopy

In article it is offered to set groups of sensors so that to determine the geometrical dimension of defect (the beginning-end of defect, its depth). The sensor is constructed in the form of the multielement transformer as which magnetosensitive element the ferroprobe with impulse excitation is used.

Keywords: defect; multielement transformer; ferroprobe; impulse excitation; leakage field

УДК 620.179.16

С. Е. Михайлов, студент
E-mail: sergey-mihailov95@mail.ru
С. С. Мкртчян, студент
E-mail: sergsmile@yandex.ru
В. А. Стрижак, кандидат технических наук, доцент
E-mail: str@istu.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Адаптация датчика дефектоскопа АДНШ для контроля композитной арматуры

Произведена разработка, изготовление, сборка и опробование адаптера на датчик для дефектоскопа акустического насосных штанг (АДНШ) в целях контроля протяженных объектов из композитной арматуры.

Ключевые слова: акустический контроль; волноводный контроль протяженных объектов; аппаратные средства контроля; композитная арматура

Введение

Композитная арматура на сегодняшний день представляет собой равноценную замену стальным аналогам, превосходя по некоторым параметрам металлические изделия. Она представляет собой неметаллические стержни из стеклянных, базальтовых, углеродных или арамидных волокон, пропитанных термоактивным или термопластичным полимерным связующим и отвержденных (рис. 1).

Рис. 1. Номенклатура композитной арматуры

© Михайлов С. Е., Мкртчян С. С., Стрижак В. А., 2017
Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00051).

Контроль композитной арматуры по ГОСТ 31938–2012 осуществляют только разрушающим методом. Неразрушающим методом контроль композитной арматуры возможен волноводным методом акустического контроля. Данный метод реализован в акустическом дефектоскопе насосных штанг АДНШ (рис. 2). С помощью него можно контролировать любые протяженные объекты длиной более 3 м и диаметром до 30 мм.

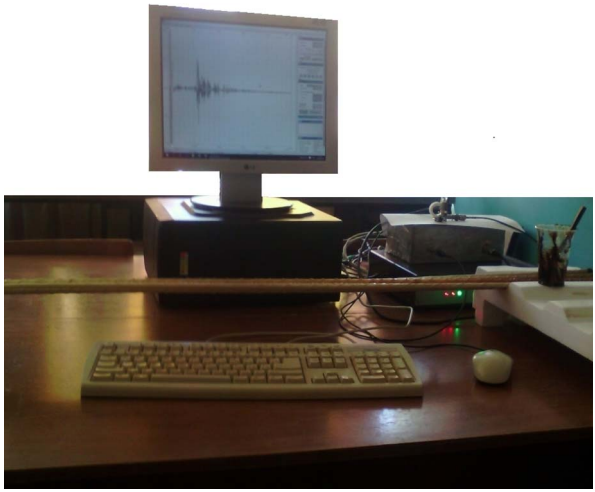


Рис. 2. Дефектоскоп АДНШ

Дефектоскоп АДНШ является дефектоскопом специального назначения и предназначен для неразрушающего контроля тела насосных штанг на наличие дефектов типа нарушения сплошности или однородности металла эхо-импульсным методом. Для контроля насосных штанг используются бесконтактные электромагнитно-акустические излучатели и контактный пьезопреобразователь (ПЭП) [1, 2]. Но поскольку структура композитных материалов существенно отличается от металлических изделий, то использование данного вида преобразователя для контроля композитной арматуры невозможно (материал нетокопроводящий).

Контроль композитной арматуры возможен только с применением пьезопреобразователей. Данный вид преобразователей является контактным. Поэтому одно из важных условий для контроля – это необходимость создания хорошего акустического контакта с объектом кон-

троля. Для этого в графической программной среде Компас-3D была создана модель адаптера, с помощью которого контроль прутков диаметром 8 мм осуществляется с использованием ПЭП (рис. 3).

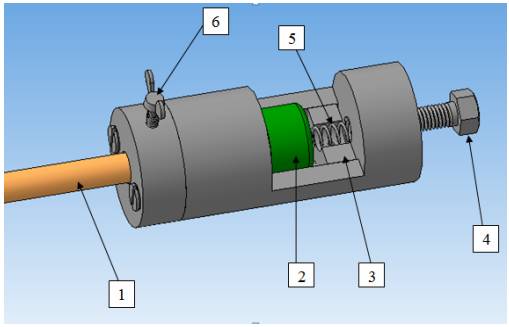


Рис. 3. Адаптер для датчика: *1* – композитная арматура; *2* – пьезоэлектрический датчик (ПЭП); *3* – ограничитель; *4* – болт для изменения усилие прижима датчика к торцу объекта контроля ОК; *5* – пружина; *6* – барашковый винт для фиксации стеклопластиковой арматуры

Композитная арматура (*1*) устанавливается в адаптер до упора ПЭП (*2*). С помощью винта (*6*) пруток фиксируется. Пружина (*5*) обеспечивает постоянное усилие прижима на ПЭП (*2*), обеспечивая контакт датчика с объектом контроля. Усилие пружины можно менять, закручивая болт (*4*).

Использование ПЭП в совмещенном режиме не предусмотрено в дефектоскопе АДНШ. Применение пьезопреобразователя можно реализовать с помощью специального переходника, схема которой указана на рисунке (рис. 4). Зондирующий импульс с генератора поступает на имитатор излучателя L1, R1. Индуктивность L1 совместно с конденсатором генератора ударного импульса настроена на частоту зондирующего сигнала. Через диод VD1 ударный импульс поступает на ПЭП. При регистрации сигналов с ПЭП импульсы проходят через защитную цепь R2, VD2, VD3 и поступают на входной тракт дефектоскопа [3, 4].

Управление оборудованием дефектоскопа осуществляется в специализированном программном продукте *Monitor*. Выставляются необходимые параметры контроля (режим работы, частота, усиление по звеньям, ручной или автоматический запуск) После установки осуществляется прозвучивание прутка. Получаем эхограмму на экране монитора (рис. 5).

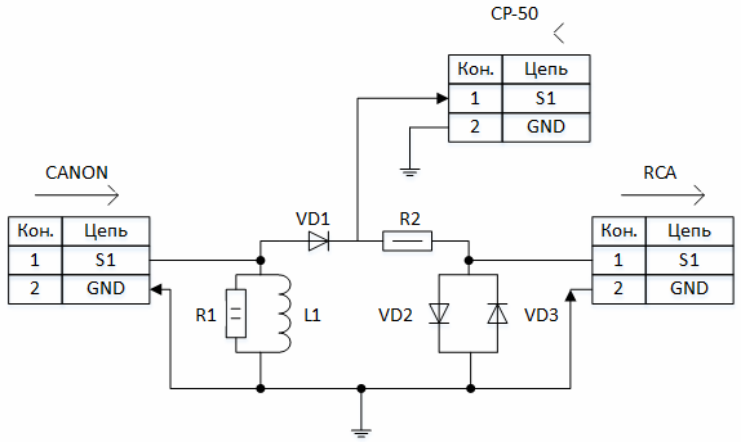


Рис. 4. Электрическая схема переходника

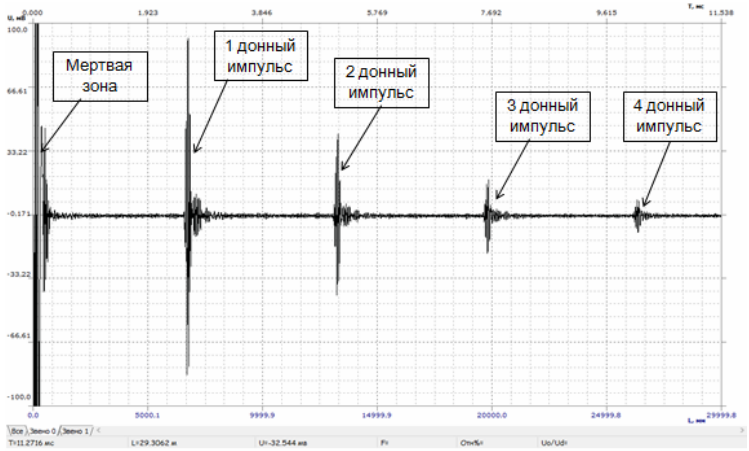


Рис. 5. Эхограмма прутка

Испытание адаптера производились на стеклопластиковой арматуре. На анализ представлено 4 партии прутков разных производителей.

Контроль производился только с одной стороны. Прутки, с диаметром превышающим проходной диаметр адаптера контролю не подвергались. Это характерно для одного производителя. Доля прутков не прошедших контроль составила 20 % (табл. 1).

Таблица 1. **Объем контролируемых прутков разных производителей**

Производитель	Цвет	Общее количество	Прокон-тролировано	Отсутствующие номера
№ 1	–	300	238	01, 04, 07-09, 17, 26, 29, 31, 38–39, 47, 52, 58, 71–73 и т. д
№ 2	–	298	269	216, 193, 191, 110, 112, 106, 191, 80, 81, 57-59, 61, 62, 45, 27
№ 3		300	296	194, 196, 200
№ 4	Чер-ный	300	299	151
Всего	–	1198	1105	–

Основные дефекты: пережег, недостаток или излишек эпоксидной смолы, расслоения, обрыв стекловолоконной нити.

Дефектоскопия проводилась по результатам оценки формы эхограммы. Средний уровень шума тела прутка определялся на участке от 1,5 м. со стороны установки датчика до 0,5 м от противоположного торца. Расчет уровня шума произведен как отношение максимального уровня сигнала, к амплитуде донного сигнала выраженное в процентах к амплитуде донного импульса

$$k = \frac{U_{\text{ш}}}{U_{\text{д}}} \cdot 100\%,$$

где $U_{\text{ш}}$ – размах шума; $U_{\text{д}}$ – размах первого донного импульса.

Из табл. 2 видно, что партии прутков не сильно различаются по среднему уроню шума 4,3–8,1 %. В табл. 3 произведена оценка шума всех объектов контроля без выделения дефектных прутков (локальные дефекты, протяженные дефекты).

Таблица 2. **Оценка величины акустических шумов в прутках**

Показатель	Все образцы	Производитель			
		1	2	3	4
Количество	1102	238	269	296	299
Максимальный шум	84,1	17,3	14,9	84,1	23,9
Минимальный шум	1,56	1,71	1,56	1,85	2,12
Средний шум	5,97	4,95	4,29	8,07	6,21

К пруткам с локальными дефектами отнесены прутки, имеющие четкий локальный импульс на анализируемом участке, амплитуда от дефекта определена в процентах от величины донного сигнала (рис. 6).

Таблица 3. **Дефектные прутки**

Файл	Координата, м	Коэффициент, %	Файл	Координата, м	Коэффициент, %
1-003	3,32	8,5	3-037+2	2,15	29,6
1-013	2,47	13,2	3-045+3	3,78	12,6
1-059	1,78	18,2	3-047+1	6,66	21,0
1-148	3,46	4,3	3-072+2	1,39	8,1
1-151	6,18	15,1	3-087+3	3,32	6,3
1-260	5,65	5,2	3-089+3	3,51	6,2
1-263	3,59	13,4	3-107+1	5,35	9,0
1-280	2,31	9,9	3-246	2,67	24,7
2-219	4,83	11,7	3-249+2	3,04	36,9
2-254	5,3	7,7	3-273+3	3,06	23,1
			3-274+3	3,38	17,5
			4-201+6	2,87	7,9
			4-300+6	2,91	10,6

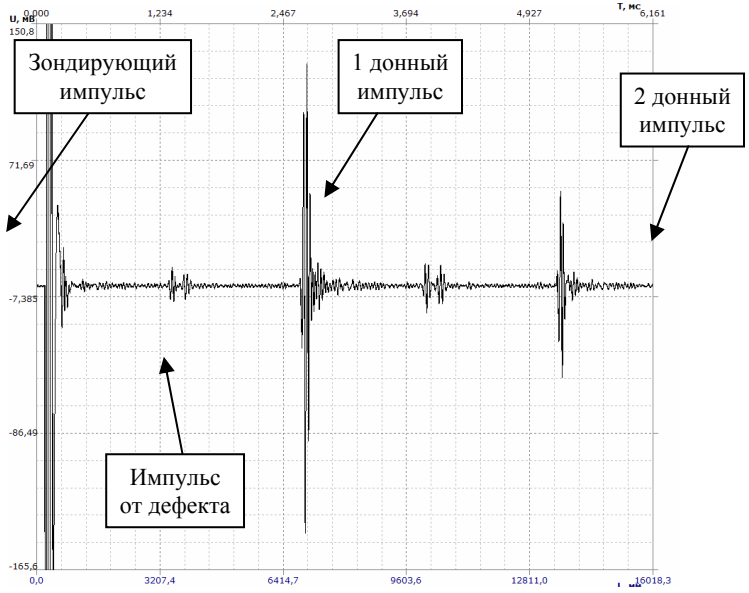


Рис. 6. Эхограмма прутка с дефектом

Выводы

Разработанный адаптер и переходник позволили использовать волноводную методику акустического контроля, реализованную в дефектоскопе АДНШ в целях исследования композитной арматуры.

Проконтролировано 1198 (100 %) образцов, выявлены отклонения диаметра прутка 94 (7,8 %), обнаружены дефектные прутки 23 (1,9 %).

Список литературы

1. Технология акустического волноводного контроля насосно-компрессорных труб / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин // В мире неразрушающего контроля. – 2014. – № 4(66). – С. 55–60.

2. Акустический волноводный контроль элементов глубинно-насосного 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.

3. *Хасанов*, *Р. Р.* Оптимизация параметров схемы возбуждения ЭМА датчика / Р. Р. Хасанов, А. В. Пряхин, В. А. Стрижак ; науч. ред. В. И. Заболотских // 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. 246–252.

4. *Хасанов*, *Р. Р.* Модификация генератора зондирующих импульсов дефектоскопа АДНШ / Р. Р. Хасанов, А. В. Пряхин, В. А. Стрижак ; науч. ред. В. И. Заболотских // 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. 241–246.

Adaptation ADNH Defectoscope Sensor for Quality Control of the Composite Armature

Produced design, manufacture, assemblage and testing of the adapter for acoustic sucker rods defectoscope (ADNH) sensor in the order to control of the extended composite armature objects.

Keywords: acoustic testing; guided wave testing of extended objects; hardware controls; composite armature

УДК 620.179.16

С. С. Мкртчян, студент
E-mail: sergsmile@yandex.ru
С. Е. Михайлов, студент
E-mail: sergey-mihailov95@mail.ru
В. А. Стрижак, кандидат технических наук, доцент
E-mail: str@istu.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Особенности расчета информативных параметров для волноводного метода акустического контроля композитной арматуры

Разработана методика расчета информативных параметров для волноводного акустического контроля композитной арматуры с использованием оборудования дефектоскопа акустического насосных штанг АДНШ. Промоделировано в программной среде MathCAD выделение информативных параметров из сигналов, зарегистрированных в программной среде дефектоскопа АДНШ.

Ключевые слова: акустический неразрушающий контроль; волноводный контроль линейно-протяженных объектов; обработка данных; расчет параметров; композитная арматура

Введение

В наше время широкое распространение во многих областях получила композитная арматура. Она представляет собой неметаллические стержни из стеклянных, базальтовых, углеродных или арамидных волокон, пропитанных термореактивным или термопластичным полимерным связующим и отвержденных (ГОСТ 31938–2012).

Структура композитной стеклопластиковой арматуры (рис. 1) исключает наличие металла, но она широко распространена в строительстве и поэтому также нуждается в контроле качества. Большинство методов НК, основанных на электромагнитных явлениях неприменимы для контроля в композитных материалах. Однако контроль данного типа арматуры с использованием волноводного метода акустического контроля возможен. Волноводный метод акустического контроля реализован в акустическом дефектоскопе насосных штанг

© Мкртчян С. С., Михайлов С. Е., Стрижак В. А., 2017
Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00051).

АДНШ. Контроль осуществляется с торца изделия. Акустический импульс проходит вдоль объекта контроля, отражается от противоположного торца и регистрируется в зоне излучающего датчика. Акустический импульс отражается от дефектов и регистрируется приемником. Отклонение скорости распространения акустических импульсов от типового значения несет информацию о структуре и механических свойствах изделия [1]. Структурная схема дефектоскопа АДНШ адаптированная для контроля стеклопластиковая арматуры представлена на рис. 2.

Рис. 1. Сортамент композитной стеклопластиковой арматуры

Блок ГПУ функционально состоит из двух независимых частей: генератор и предварительный усилитель. Блок ПЭП устанавливается на торец контролируемого объекта. Излучатель блока ПЭП подключается к излучателю блока ГПУ, а приемник блока ПЭП подключается к предварительному усилителю блока ГПУ. Блок УКП функционально состоит из коммутатора, управляемого усилителя и буфера сопряжения с ПК. К входу коммутатора блока УКП подключается блок ГПУ. Сигнал с выхода программируемого усилителя блока УКП поступает на плату АЦП, установленную в ПК. Информационные сигналы поступают из платы АЦП ПК в блок УКП [2].

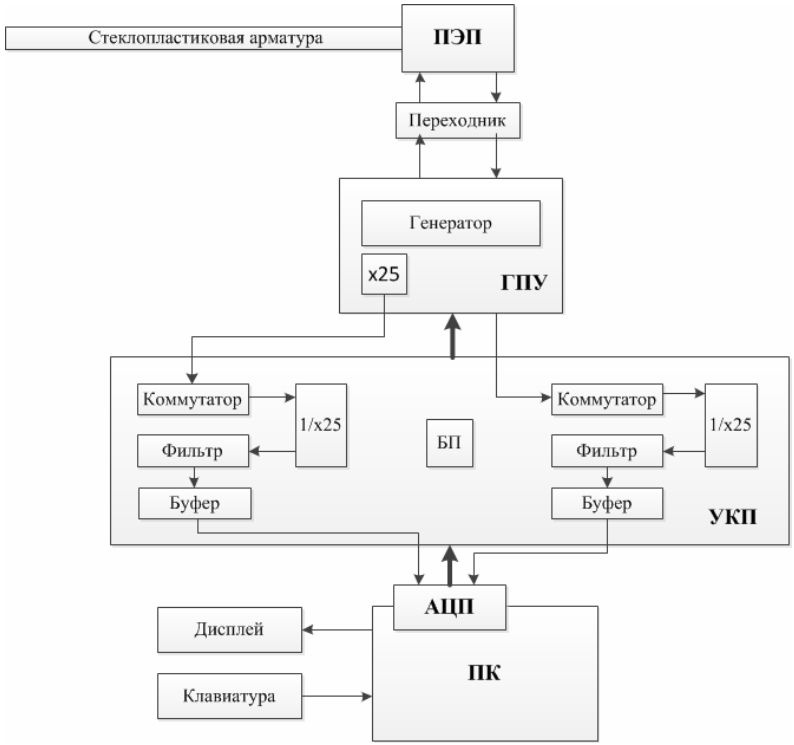


Рис. 2. Структурная схема дефектоскопа АДНШ: ПЭП-преобразователи; переходник для использования ПЭП; ГПУ – блок генератора и предусилителя; УКП – блок программируемого усилителя, коммутатора и источника питания; АЦП – плата аналого-цифрового преобразования для ввода акустического сигнала в ПК; ПК – персональный компьютер

Расчет информативных параметров

На рис. 3 представлена эхограмма, зарегистрированная с помощью программного обеспечения дефектоскопа АДНШ.

На эхограмме различаются зондирующий импульс и несколько донных импульсов. Между зондирующим и первым донным импульсами есть некий сигнал, превышающий уровень шума. Данный сигнал, вероятно, появился в результате наличия дефекта в контролируемом образце. Также на рис. 3 видны возможности программного обеспечения дефектоскопа АДНШ, а именно: сравнение уровней сигналов для определения бракованной продукции; проекция для определения коэффициента затухания волны.

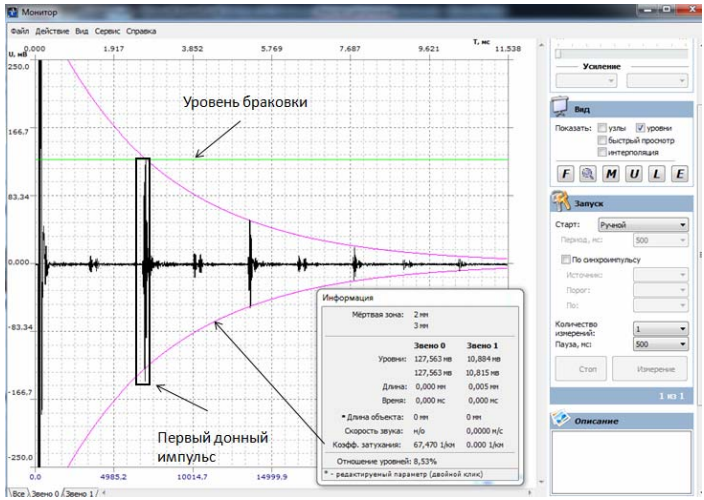


Рис. 3. Эхограмма зарегистрированного сигнала

Для проведения акустического контроля с помощью дефектоскопа АДНШ, дефектоскопист часто полагается на собственный опыт, т. к. невозможно с точностью сказать, является ли подозрительный участок эхограммы дефектом, либо это просто шумы датчика, связанные с нехваткой контактной жидкости или наличием шероховатостей на торце контролируемого объекта. Скорость акустической волны определяется совокупностью физических свойств контролируемых объектов и перспективно для целей структуроскопии [3]:

$$C = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \qquad (1)$$

где E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; ρ – плотность.

Стандартное ПО дефектоскопа не предназначено для одновременного определения следующих информативных характеристик (скорость волны, амплитуда первого и последующих донных импульсов, время прохождения, шаг по времени, границы мертвой зоны и координаты начала и конца донных импульсов) [4]. Задача программы в среде *MathCAD* – моделирование автоматического определения характеристик на выбранном участке эхограммы дефектоскопа АДНШ/АДНКТ. Для анализа амплитуды, координат и временных характеристик необходимо выделить область для анализа в определенных временных

рамках, с учетом шага дискретизации. Для нахождения амплитуды выделяются временные рамки первого донного импульса и определяются точки максимума, это позволяет выявить координату максимума амплитуды донного импульса. В программе реализован вывод этих значений в текстовый файл.

Для нахождения скорости использовалась формула

$$C = \frac{2L}{t}, \tag{2}$$

где C – скорость волны; L – длина участка контроля; t – время.

В свою очередь,

$$t = T_2 - T_1, \tag{3}$$

где T_2 – координата конца импульса; T_1 – координата начала импульса.

Определение координаты по времени, с которой начинается первый донный импульс затруднительно, т. к. эхограмма часто зашумлена [5]. Для точного определения сдвига первого и второго донных импульсов используется корреляционный анализ (рис. 4). На рисунке изображен фрагмент расчета координаты первого донного импульса относительно второго.

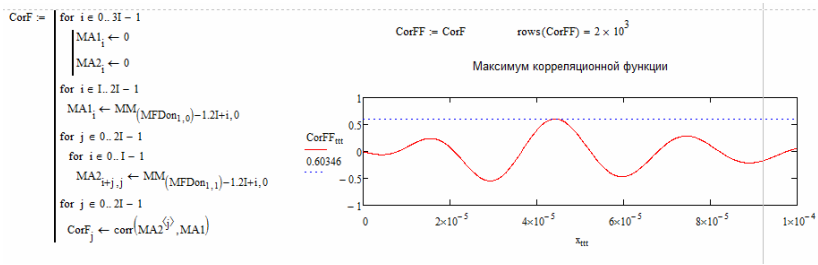


Рис. 4. Корреляционный анализ

По результатам грубой оценки рассчитывается окно, где производится интерполяция (вычисление промежуточных значений функции) для более точного определения местоположения координаты начала донного импульса и уже интерполированная функция проходит процедуру корреляции. В конечном итоге получается точное значение скорости акустической волны, с возможностью вывода их в отдельный текстовый файл (рис. 5).

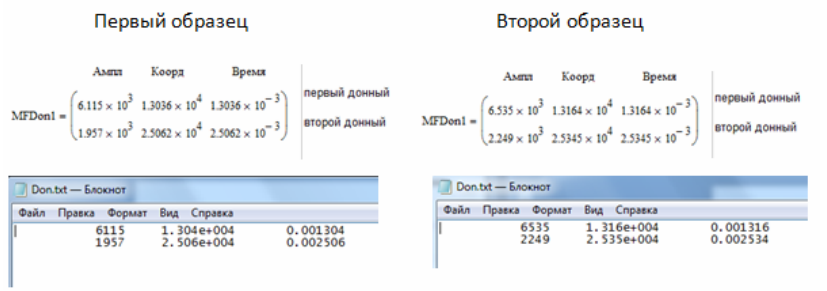


Рис. 5. Вывод результатов анализа в текстовый файл

Данная технология предполагает оперирование большими количествами математических операций и поэтому требует соответствующего оборудования. При наличии подходящей техники и специалистов программа может быть доработана, усовершенствована и применена в работе любой организации, занимающейся неразрушающим акустическим контролем.

Выводы

Разработан программный модуль расчета информативных параметров контроля протяженных объектов из пластиковой арматуры на базе результатов, зарегистрированных дефектоскопом АДНШ. Программный модуль является прототипом для разработки программного обеспечения.

Программный модуль проводит расчет характеристик (скорость волны, амплитуда первого и последующих донных импульсов, время прохождения, шаг по времени, границы мертвой зоны и координаты начала и конца донных импульсов) зарегистрированных сигналов. Точный расчет скорости ультразвуковой волны через коэффициент корреляции, с использованием интерполяции промежуточных значений позволяет адаптировать дефектоскоп АДНШ к целям структуроскопии композитных материалов. Доработка программы позволит автоматически вычислять параметры групп эхограмм.

Список литературы

1. 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.

2. Технология акустического волноводного контроля насосно-компрессорных труб / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов,

А. В. Пряхин // В мире неразрушающего контроля. – 2014. – № 4(66). – С. 55–60.

3. 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 : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2014. – 180 с.

4. Импульсный метод измерения скорости ультразвука / Г. А. Буденков, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Г. А. Полянкин, Я. Ю. Коршунов, О. В. Недзвецкая // Дефектоскопия. – 1998. – Т. 9. – С. 3–8.

5. *Муравьева*, *О. В*. Влияние регулярных перепадов сечения на контролепригодность прутка при контроле акустическим волноводным методом / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин // Дефектоскопия. – 2014. – № 4. – С. 41–49.

Peculiar Properties of the Informative Parameters Calculation for the Waveguide Acoustic Testing of the Composite Armature

The method of informative parameters calculation of waveguide acoustic control of composite armature using acoustic defectoscope for sucker rod ADNH was developed. The selection of informative parameters of the signals recorded in software environment of acoustic defectoscope ADNH was modeled in software environment MathCAD.

Keywords: acoustic non-destructive testing; waveguide control of linearly extended objects; data processing; calculation of the parameters; composite armature

УДК 620.179.16

В. В. Муравьев, доктор технических наук, зав. кафедрой
Д. А. Якимов, студент
E-mail: pmkk@istu.ru
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), СибГИУ (г. Новокузнецк)

Влияние твердости рельсов на скорость распространения головных волн

Исследовано изменение скоростей распространения головных волн в отрезках рельсов с разной степенью наработки. Произведены измерения твердости по сечению рельса. Показано влияние срока эксплуатации рельсов на измеряемые акустические параметры в сравнении с неэксплуатировавшимися рельсами.

Ключевые слова: акустический контроль; головные волны; твердость; остаточные напряжения; рельсы

Введение

Наличие механических напряжений в рельсах сильно влияет на их механические свойства и эксплуатационные качества. Так, растягивающие напряжения могут сильно снизить срок службы изделия, приводя к росту трещин и разрушению материала, а сжимающие – способны наоборот, повысить устойчивость деталей по отношению к внешним нагрузкам, однако в бесстыковом пути могут привести к выбросу рельсов. Срок эксплуатации рельсов напрямую зависит от того, в каких климатических условиях они используются. Сжимающие напряжения, возникающие при низких температурах, и растягивающие напряжения при высоких температурах способны снизить срок эксплуатации рельсового пути [1].

Задача продления срока эксплуатации деталей и конструкций приводит к развитию методик оценки остаточных напряжений, возникающих при эксплуатации и изготовлению элементов конструкций. Остаточные напряжения возникают или перераспределяются при механических нагрузках в процессе эксплуатации рельса, при сварке, а также при различной обработке поверхности, например, при шлифовке поверхности катания. В этой связи актуальны исследования, в которых изучаются закономерности возбуждения и приема ультра-

© Муравьев В. В., Якимов Д. А., 2017
Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-12-00010).

звуковых волн с учетом непростой геометрии рельса и изменения их твердости [1–4].

Методика измерений

Одним из наиболее перспективных методов неразрушающего контроля напряженного состояния является ультразвуковой метод. Он основаны на явлении акустоупругости и связи остаточных напряжений с задержкой распространения акустических волн, поскольку механические напряжения приводят к изменению скорости звука в среде.

Для реализации измерений использовалась установка, включающая в себя два ПЭП и дефектоскоп УД9812 «Уралец», фотография установки представлен на рис. 1, *а*. Схема установки приведена на рис. 2.

а *б*

Рис. 1. Фотография установки (*а*); твердомер T-UD3 (*б*)

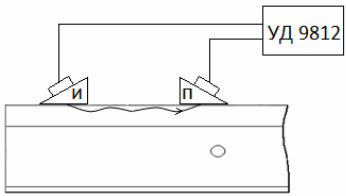


Рис. 2. Схема измерений скоростей головной волны

Объектом контроля были шесть рельсов с разными годами изготовления и различной наработкой. Данные приведены в табл. 1.

Таблица 1. **Характеристика рельсов**

№ рельса	Тип рельса	Год изготовления	Наработка, млн. тонн брутто
1	Р 65	2013	нет
2	Р 65	2013	нет
3	Р 65	1996	400
4	Р 65	1996	400
5	Р 65	–	600
6	Р 65	1984	840

Для оценки влияния твердости на скорость головной волны использовался твердомер T-UD3 (рис. 1, *б*).

Измерения скорости ультразвука в рельсе проводилось с головки рельса в трех точках наклонным пьезоэлектрическим преобразователем головной волны под углом 27º (рис. 3).

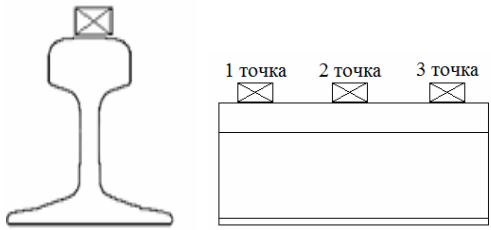


Рис. 3. Схема установки наклонного пьезоэлектрического преобразователя

Таким образом, в ходе измерения, были получены значения времени пробега акустической волны от излучателя к приемнику в виде осциллограмм рис. 4.

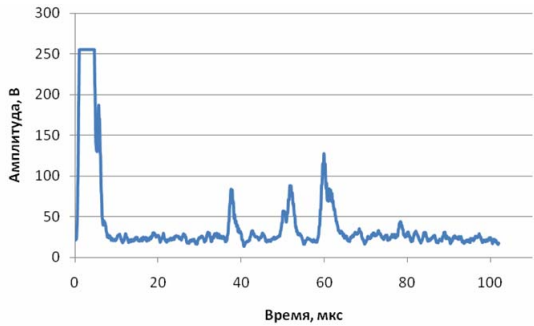


Рис. 4. Полученный сигнал с пьезоэлектрическим преобразователем

При расчете скорости необходимо было учесть время задержки в призме. Скорость головной волны вычислялся по формуле

$$C = \frac{l}{t - \left(t_{1\text{пр}} + t_{2\text{пр}}\right)},$$

где l – длина измерительной базы, мм; t – время пробега акустической волны по измерительной базе, мкс; $t_{1\text{пр}}$, $t_{2\text{пр}}$ – время задержки в призме, мкс.

Измерения твердости по сечению рельса производились через каждые 5 мм (рис. 5).

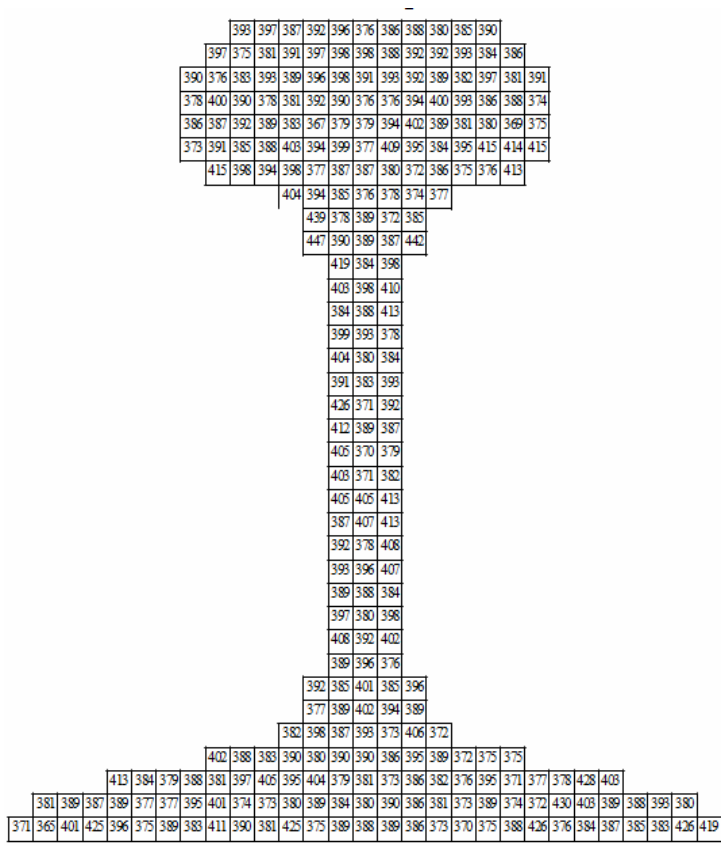


Рис. 5. Схема измерения твердости по Бринелю по сечению рельса

Результаты исследований

На рис. 6 представлен график со скоростями головных волн от наработки.

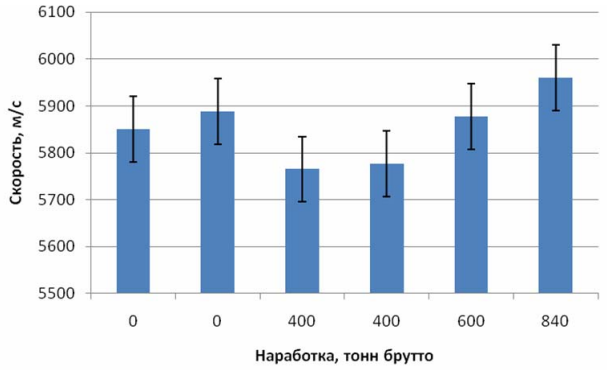


Рис. 6. Скорости головных волн от наработки

По результатам измерения скорости головной волны видно, что скорость увеличивается от увеличения наработки. На новых рельсах скорости примерно равны 5850 м/с, что является теоретическим значением.

График твердости по головке рельса от наработки рельса представлен на рис. 7.

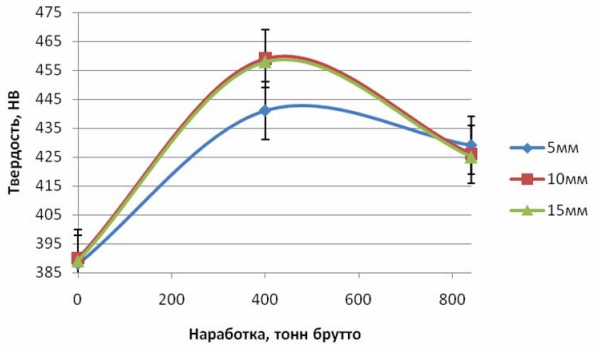


Рис. 7. Твердость по головке рельса

Как видно из графика (рис. 7), у рельса с наработкой 0 тонн брутто твердость ниже, чем у эксплуатировавшихся.

Анализ результатов измерения скоростей волн и твердости рельсов показывает, что с ростом твердости рельса скорость головной волны уменьшается. Таким образом, головная волна может являться информативным параметром при оценке структуры и напряженного состояния рельса.

Выводы

Получены экспериментальные значения времени пробега акустической волны от источника к приемнику на образцах рельса.

По полученным данным можно судить о том, что с увеличением наработки скорость увеличивается. Увеличенное значение скорости в новых рельсах связано с более низкой твердостью, чем в рельсах после эксплуатации, т. е. различной структурой рельса. Необходимо учитывать структуру рельса при оценке остаточного напряжения головными волнами.

Список литературы

1. Лазерно-ультразвуковой метод выявления продольных напряжений рельсовых плетей / А. А. Карабутов, А. Н. Жаринов, А. Ю. Ивочкин, А. Г. Каптильный, А. А. Карабутов (мл.), Д. М. Ксенофонтов, И. А. Кудинов, В. А. Симонова // Управление большими системами: сборник трудов. – 2012. – № 38. – С. 183–203.

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

3. *Ермолов*, *И. Н.* Неразрушающий контроль : справ : в 7 т. – Т. 3. Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге ; под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2004. – 835 с.

4. Акустический волноводный контроль элементов глубиннонасосного оборудования / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин, Ю. В. Мышкин // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 9. – С. 110–115.

The Influence of Rail Hardness on the Head Wave Propagation Velocity

The change in the propagation velocities of head waves in the rail segments with different degrees of use is studied. The measurement results of hardness in the cross section of the rail are presented. The influence of the rails operating time on the measured acoustic parameters in comparison with the new rails is discussed.

Keywords: acoustic testing; head waves; hardness; residual voltage; rails

УДК 620.179.16.05

В. В. Муравьев, доктор технических наук, зав. кафедрой
К. А. Тапков, аспирант
E-mail: pmkk@istu.ru
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова (г. Ижевск), СибГИУ (г. Новокузнецк)

Возможности использования акустоупругого метода для контроля дифференцированно закаленных рельсов

Рассмотрены причины появления остаточных напряжений в рельсах, технологии термической обработки рельсов, особенности неразрушающего контроля рельсов и явление акустоупругости для контроля остаточных напряжений.

Ключевые слова: неразрушающий контроль; акустоупругость; рельс; дифференцированная закалка

Введение

Одной из главных задач на железной дороге является обеспечение безопасной эксплуатации сложных технических объектов ответственного назначения. В общем случае прочность элементов конструкций и машин, а также их ресурс задаются на стадии разработки и проектирования. Однако воздействие на деталь знакопеременных нагрузок, коррозионных сред, колебаний температуры и наличие в материале детали технологических или эксплуатационных дефектов существенно снижают срок службы объекта. Выход из строя детали в эксплуатации способен привести к катастрофическим последствиям: аварии или крушению. Для предотвращения внезапного разрушения, вызванного развитием усталостных дефектов, проводят периодический неразрушающий контроль. Используемые методы и средства дефектоскопии ориентированы на выявление значительных по размерам, критически развитых дефектов [1].

Остаточные напряжения являются наиболее частой причиной разрушения многих металлических конструкций, в том числе рельсов. Эти напряжения в сталях могут достигать предела текучести, они часто оказываются наиболее опасными в отношении снижения прочности, чем некоторые типы дефектов. Эти напряжения всегда внутренние, и их образование всегда связано с неоднородными линейными или

© Муравьев В. В., Тапков К. А., 2017
Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-12-00010).

объемными деформациями в смежных объемах материала, агрегата или конструкции [1, 2].

Разрушение рельсов ведет к неизбежным и катастрофическим последствиям, таким как сход вагонов или целых составов с пути. Остаточные напряжения возникают при механических нагрузках в процессе эксплуатации рельса, при сварке, а также возникают в процессе производства. Это приводит к тому, что в вершине трещины некритических размеров появляется концентрация напряжений, которые, суммируясь с остаточными технологическими напряжениями, приводят к ускорению роста трещины и существенно сокращают долговечность конструкции [3].

Задача анализа остаточных напряжений является одной из наиболее актуальных тем среди многочисленных проблем, связанных с рельсами, поскольку наличие таких напряжений в рельсах сильно влияет на механические свойства, эксплуатационные качества и срок эксплуатации. Знание величины напряжений в рельсах позволит получить информацию об их состоянии, что, в свою очередь, позволит избежать аварийных ситуаций.

Существуют различные методы контроля напряженно-деформированного состояния, однако, учитывая особенности рельс, в частности такие, как большая протяженность рельса и пути в целом, необходимость контроля рельса без его снятия с пути, на выбор метода накладываются определенные ограничения. Одним из наиболее перспективных методов контроля является акустоупругий метод, уже успешно зарекомендовавший себя в контроле ободьев железнодорожных колес. Для напряжений существует следующая зависимость [4]:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{t_1 - t_2}{t_1},$$

где σ_1 и σ_2 – напряжения в продольно-вертикальной и поперечно-вертикальной плоскостях соответственно; t – время прохождения сдвиговой волны, поляризованной в плоскости, обозначенной соответствующим индексом.

Как уже было сказано, остаточные напряжения в рельсе возникают, в том числе, при его изготовлении после прохождения рельсом термической обработки. На данный момент идет отказ от технологии объемной закалки рельса в масле, современные технологии производства рельс, примененные как в отечественном (ЕВРАЗ ЗСМК, МЕЧЕЛ ЧМК), так и в зарубежном (*Nippon Steel*) включают в себя дифференцированную закалку, при которой различные элементы рельса (голов-

ка, шейка) имеют различную скорость охлаждения [5]. 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.

Данная задача упрощается с учетом того, что для изготовления наиболее подходящих под ТУ 0921-276-01124323–2012 и ГОСТ Р 51685–2013 рельс и повышения их эксплуатационных качеств уже были проведены различные исследования [5, 6], затрагивающие использование различных по химическому составу сталей, различных скоростей охлаждения и температур нагрева.

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. В то же время использование стали Э76Ф, использовавшейся при производстве рельс по технологии объемной закалки, не оправдано при использовании технологии дифференцированной закалки, т. к. обладает после термической обработки низким значением твердости, не соответствующим ГОСТ. Это связано с недостаточной охлаждающей способностью воздуха для этой марки стали по сравнению с маслом [5].

В то же время в источнике [6] было проведено моделирование процесса закалки для определения структуры рельса. В результате этого получены следующие данные: после закалки в масло рельса Р65 структура вблизи торца у края подошвы рельса содержит до 89 % мартенсита. Максимальная удельная доля феррита-карбида во внутренних областях составляет около 50 %.

Выводы

1. Увеличение грузозагруженности рельсов, повышение скоростей движения, использование новых технологий при изготовлении рельсов вызывает необходимость иссследования внутренних остаточных напряжений.

2. Для оценки влияния уровня остаточных напряжений на долговечность рельса необходимо провести моделирование начальных условий, т. е. оценить напряженно-деформированное состояние рельса после его термической обработки по технологии дифференцированной закалки.

3. При разработке методики по оценке долговечности рельса во время его эксплуатации акустоупругим методом должны быть использованы результаты дефектоскопирования с определением условных размеров трещин.

Список литературы

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

2. *Буденков, Г. А.* Исследование напряженно-деформированного состояния ободьев цельнокатаных вагонных колес методом акустической тензометрии / Г. А. Буденков, В. В. Муравьев, О. В. Коробейникова // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2009. – Т. 6. – № 3. – С. 111–117.

3. Оценка остаточных напряжений в рельсах с использованием электромагнитно-акустического способа ввода-приема волн / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, В. Е. Громов, А. М. Глезер // Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 12. – С. 34–37.

4. Информационноизмерительная 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.

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 // Вестн. Сиб. гос. индустриальн. ун-та. – 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. – 2015. – № 07. – С. 1–13.

Using Acoustoelasticity Method for Monitoring the Rail after Differentiated Hardening

In the article it is described the reasons of appearance of residual stresses in rails, technology of thermal treatment of rails, and features of nondestructive testing of rails and phenomenon of acoustoelastic for monitoring of residual stresses.

Keywords: nondestructive testing; acoustoelastic; rail; differential hardness

УДК 620.19+534.231

Ю. В. Мышкин, старший преподаватель
А. А. Фотина, студентка
Ю. О. Кощеева, студентка
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Влияние количества элементов в фазированной решетке на эффективность фокусировки в трубах большого диаметра

Исследованы зависимости параметров фокусного пятна и положения акустического фокуса от геометрических параметров трубы и количества полосковых преобразователей с использованием предложенной методики в программной среде COMSOL Multiphysics.

Ключевые слова: фокусировка; фазированная решетка; волна горизонтальной поляризации; трубопровод

Введение

Фазированные решетки (ФР) относятся к многоэлементным преобразователям в ультразвуковой (УЗ) диагностике и неразрушающем контроле (НК). Фазированные решетки обладают рядом преимуществ перед одноэлементными преобразователями, в частности, возможностями фокусировки и углового сканирования, исследования труднодоступных участков объекта контроля. Фазированные решетки успешно используются в волноводном методе контроля цилиндрических линейно-протяженных объектов контроля с использованием различных типов волн – стержневой S, продольной L, изгибной F, крутильной T.

Фазированные решетки формируют временные задержки при помощи фазирующего устройства, за счет чего на апертуре трубы создается требуемое распределение смещений, которое вызывает фокусировку. Управляя временными задержками, возможно получить фокус на различных расстояниях по периметру и длине трубы. При возбуждении основного типа волны могут возникать мешающие типы мод и появляться акустические шумы, влияющие на результаты контроля.

Использование ФР при контроле линейно-протяженных объектов, таких как трубы и прутки, дает несомненное преимущество в части увеличения чувствительности, уменьшения добротности сигнала

© Мышкин Ю. В., Фотина А. А., Кощеева Ю. О., 2017
Работа выполнена в рамках проекта № 15-19-00051 Российского научного фонда.

и мертвой зоны. Объекты подобного рода, в качестве которых выступают изделия, такие как насосно-компрессорные трубы, насосные штанги, используются в нефтяной и газовой промышленности и контролируются с использованием акустического волноводного метода [1–5]. Объектом контроля при волноводном методе могут быть как линейно-протяженные объекты, так и листовой прокат, обладающий анизотропией физикомеханических и упругих свойств, которая определяется с помощью *SH*-волн и волн Лэмба [6].

При моделировании акустических полей и процессов распространения ультразвуковых волн возникают сложности с определением граничных условий и начальных параметров, которые устраняются различными способами. Так, авторы работы [7] для упрощения трехмерной модели трубы представляют ее в виде развертки на плоскости. Это плоская пластина с изотропными упругими свойствами, имеющая боковые свободные грани, на которые применяются граничные условия в виде равенства смещений. Среди используемых методов фокусировки моделируются *CSM*, *TFM* [8], *SAFT* [9] Моделирование проводится в программе *Abaqus* [8, 9] как на бездефектной трубе диаметром 100 мм и длиной 900 мм [9], так и с дефектом в виде трещины на трубах диаметром 140 мм [8], 219,1 мм [7] и длиной 3700 мм [8], 2200 мм [7] соответственно. По результатам моделирования фокусировка позволяет увеличить амплитуду сигнала от дефекта в 2–4 раза [7, 8].

Наиболее эффективным и оперативным подходом к такому роду исследований является численное моделирование в такой специализированой среде метода конечных элементов, как *Comsol Multiphysics*, которая позволяет рассчитывать смещения в заданный момент времени и вычислять средние значения смещений за указанный период времени.

В работе представлены результаты исследования влияния количества элементов в фазированной решетке и расстояния фокусировки на эффективность фокусировки и параметры фокусного пятна в трубах большого диаметра.

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 [10]. В модели использованы граничные условия, позволяющие представить развертку трубы на плоскости путем равенства смещений на боковых гранях $E1 = E2$. Антенная фазированная

решетка состоит из пьезоэлектрических преобразователей с линейными контактами длиной *DL* и равномерно распределенными по периметру трубы, диаметром *D* формирует фокусное пятно на расстоянии *Fg* протяженностью *L* и диаметром 2*R*. В качестве примера на рис. 1 представлено распределение смещений для фазированной решетки с фокусным расстоянием *Fg* = 7 м при диаметре трубы *D* = 1,02 м, на частоте *f* = 200 кГц, при количестве элементов *N* = 128.

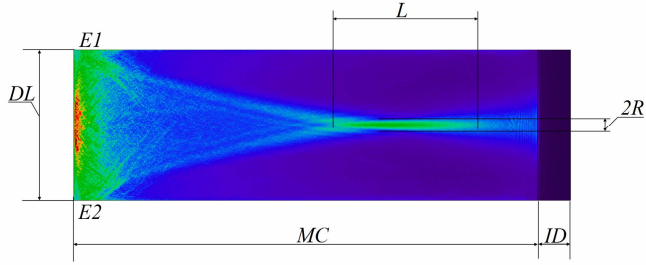


Рис. 1. Картина распредления смещений акустического поля для фазированной решетки с количеством элементов *N* = 128 для трубы с диаметром *D* = 1,02 м

В табл. 1 и 2 представлены свойства материала трубы и входные значения, среди которых диаметр трубы *D*, толщина стенки трубы *TH*, количество элементов *N* и геометрический фокус *Fg* являются изменяемыми параметрами.

Таблица 1. **Свойства материала**

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*	0,377; 0,53; 1,02	м
Апертуры трубы, *DL*	1,184; 1,665; 3,204	м
Количество элементов, *N*	16; 32; 64; 128	–
Частота, *f*	200 000	Гц
Период, *T*0	$5 \cdot 10^{-6}$	с
Время фокусировки, τ	*Fg*/*C*	с
Геометрический фокус, *Fg*	1÷9	м

Окончание табл. 2

Параметры	Численное значение	Единица измерения
Толщина стенки трубы, *TH*	0,009; 0,012; 0,014	м
Длина одного полоскового преобразователя, *DP*	0,01	м
Протяженность области основных вычислений и бесконечного пространства, *MC+ID*	1,5·*Fg*	м

Импульс силового воздействия синусоидальной формы $U(t)$, который излучает каждый полосковый преобразователь во время его возбуждения с использованием фазированных задержек, изображен на рис. 2.

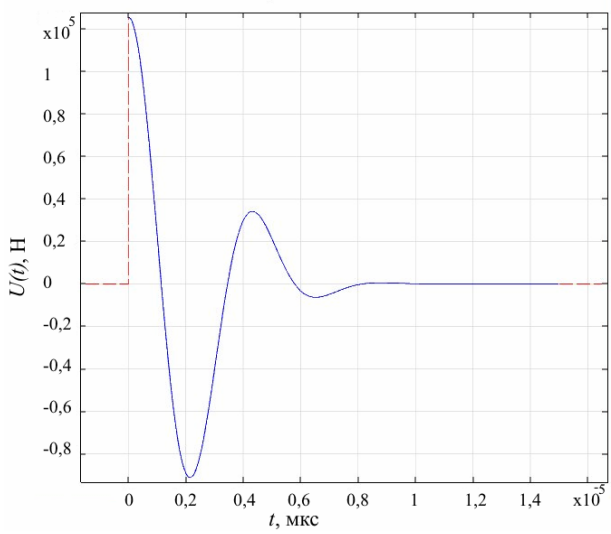


Рис. 2. Форма импульса силового воздействия, подаваемого на полосковые преобразователи

Результаты и обсуждение

Зависимости размеров фокусного пятна *L* и *2R* от положения геометрического фокуса *Fg* для труб различного диаметра при различном количестве элементов *N* представлены на рис. 3. При увеличении геометрического фокуса *Fg* наблюдается увеличение диаметра фокусного пятна *2R* и его протяженности *L*. Так, при расстоянии фокусировки

Fg = 4 м для *N* = 128 элементов диаметр фокусного пятна для трубы диаметром *D* = 0,53 м *D* = 1,02 м составил 2*R* = 0,3 м и 2*R* = 0,2 м соответственно, протяженность фокусного пятна *L* = 2,75 м и *L* = 2 м соответственно. Для трубы диаметром *D* = 0,377 м фокусное пятно при геометрическом фокусе *Fg* = 4 м и более не наблюдается.

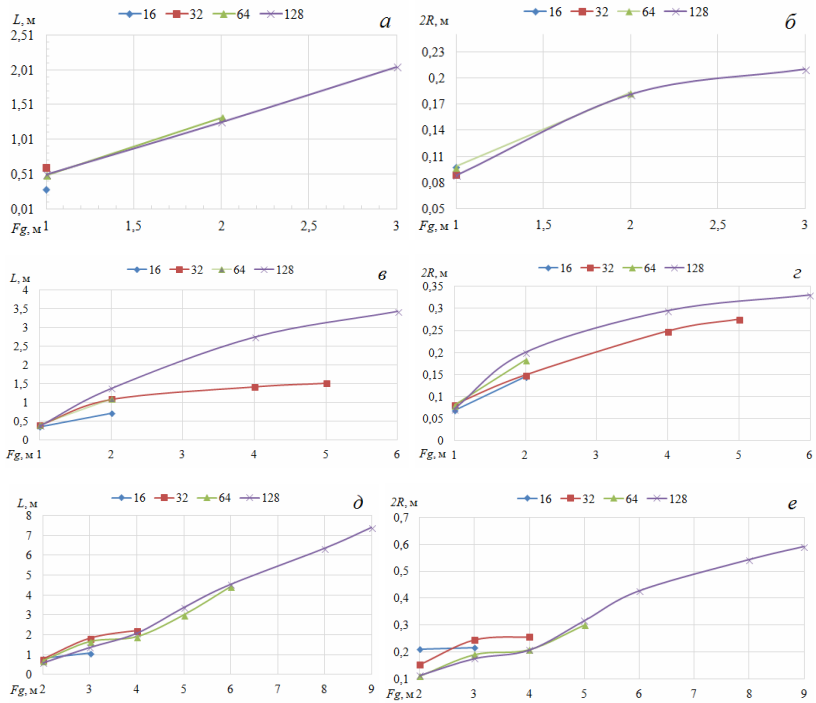


Рис. 3. Зависимости параметров фокусного пятна *L* – *а*, *в*, *д* и 2*R* – *б*, *г*, *е* от положения геометрического фокуса *Fg* при *D* = 0,377 м (*а*, *б*), *D* = 0,53 м (*в*, *г*), *D* = 1,02 м (*д*, *е*) на частоте *f* = 200 кГц

Зависимости акустического фокуса *Fa* от геометрического фокуса *Fg* при диаметре трубы *D* = 0,377 м, *D* = 0,53 м и *D* = 1,02 м представлены на рис. 4. Графики имеют нелинейные зависимости, при этом при малых значениях геометрический фокус почти не отличается от акустического фокуса. На больших расстояниях отношение геометрического фокуса к акустическому фокусу составляет от 1,5 до 2. Так, при геометрическом фокусе *Fg* = 4 м акустический фокус при *N* = 128 эле-

ментах для трубы диаметром D = 0,53 м составил Fa = 3 м, для трубы диаметром D = 1,02 м – Fa = 3,5 м.

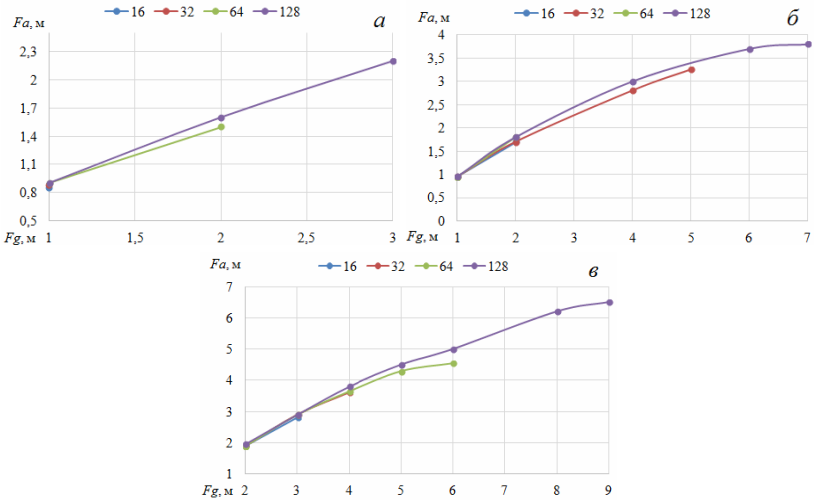


Рис. 4. Зависимости акустичесгоко фокуса Fa от геометрического фокуса Fg при D = 0,377 м (*а*), D = 0,53 м (*б*), D = 1,02 м (*в*)

В качестве примера на рис. 5 представлено расспределение по расстоянию в трубе диаметром D = 1,02 м при геометрическом фокусе Fg = 4 м. Из рис. 5 видно, что максимальное значение смещения достигается при акустическом фокусе Fa = 3,7 м, отсюда следует, что разница между акустическим и геометрическим фокусами равна 0,3 м.

Выводы

Таким образом, по результатам исследования влияния количества элементов на эффективность фокусировки в трубах большого диаметра можно сделать следующие выводы:

– чем больше количество элементов N и диаметр трубы D, тем больше протяженность L, диаметр фокусного пятна $2R$ и расстояние до акустического фокуса Fa;

– фокусное пятно для труб диаметром D = 0,377, D = 0,53, D = 1,02 м при количестве элементов N = 128 и геометрическом фокусе Fg = 4, Fg = 8, Fg = 10 м соотвественно не наблюдается.

Результаты исследования могут быть использованы для обоснования количества элементов в антенной фазированной решетке при фокусировке t_H-волн в трубах.

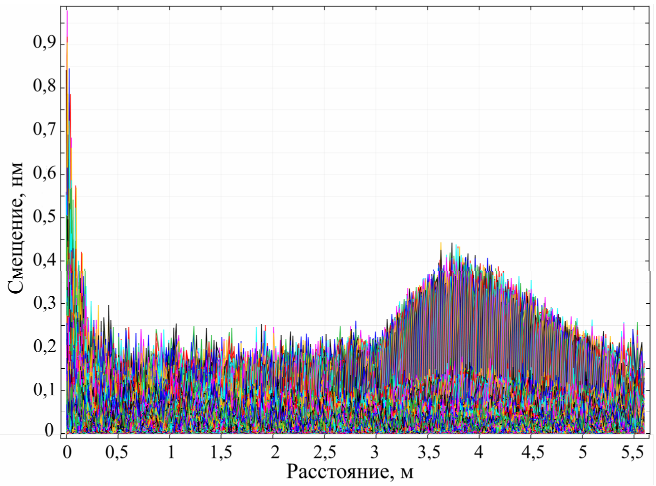


Рис. 5. Распределение по расстоянию в трубе D = 1,02 м

Список литературы

1. Акустический волноводный контроль элементов глубиннонасосного оборудования / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин, Ю. В. Мышкин // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 9. – С. 110–115.

2. *Буденков, Г. А.* Новая прогрессивная технология дефектоскопии протяженных объектов металлургической и нефтедобывающей промышленности / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Т. Н. Лебедева // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 11. – С. 18.

3. *Муравьева, О. В.* Крутильные волны, возбуждаемые электромагнитно-акустическим преобразователями, при акустическом волноводном контроле трубопроводов / О. В. Муравьева, С. В. Леньков, С. А. Мурашов // Акустический журнал. – 2016. – Т. 62, № 1. – С. 117–124.

4. Факторы, влияющие на эффективность возбуждения крутильных волн при волноводном контроле труб / О. В. Муравьева, С. В. Леньков, В. В. Муравьев, Ю. В. Мышкин, С. А. Мурашов // Дефектоскопия. – 2016. – № 2. – С. 33–41.

5. 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.

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

7. *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 Freequency Control. – 2009. – Vol. 56, No. 4. – Pp. 759–770.

8. Detection of axial cracks in pipes using focused guided waves / S. Fletcher, M. J. S. Lowe, M. Ratassepp, C. Brett // J Nondestructive Eval. – 2012. – Vol. 31. – Pp. 56–64.

9. *Rudd*, *K. E.* Simulation of guided waves in complex piping geometries using the elastodynamic finite integration technique / K. R. Leonard, J. P. Bingham, M. K. Hinders // J. Acoust. Soc Am. – 2007. – Vol. 121, No. 3. – Pp. 1449–1458.

10. *Муравьева*, *О. В.* Эффективность фокусировки волн горизонтальной поляризации в трубопроводах большого диаметра / О. В. Муравьева, С. В. Леньков, Ю. В. Мышкин // Сварка и диагностика : сб. докл. междунар. форума (Екатеринбург, 25–27 нояб. 2014 г.). – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – С. 272–277.

The Influence of Number of Elements in Phased Array on the Focusing Efficiency in Large Diameter Pipes

Dependencies of parameters of the focal spot and position of acoustic focus from the geometrical parameters of the pipe and amount of units in linear phased array are invistageted using the proposed technique in the software COMSOL Multiphysics.

Keywords: focusing; phased array; t_H-wave; pipeline

УДК 620.179.16

К. В. Петров, аспирант
А. Ф. Башарова, студентка
Г. Л. Пушина, студентка
Е. В. Недзвецкая, инженер УНИР
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Моделирование распространения акустических волн в цилиндрических объектах с дефектами в *COMSOL Multiphysics*

Представлены результаты моделирования распространения акустической волны в цилиндрическом объекте при наличии дефектов в виде бокового цилиндрического отверстия и модели поверхностной трещины. Рассчитаны коэффициенты выявляемости дефектов на различной глубине залегания.

Ключевые слова: зеркально-теневой метод; электромагнитно-акустический; численное моделирование; взаимодействие с дефектами

Введение

Цилиндрические изделия, такие как прутки, трубы и всевозможные изделия из них широко используются в сфере машиностроения, газовой и нефтяной промышленности. Использование зеркально-теневого электромагнитно-акустического метода для неразрушающего контроля (НК) пруткового проката обусловлено целым рядом его преимуществ по сравнению традиционно используемыми контактными методами ультразвукового (УЗ) контроля [1–11]. Основными преимуществами являются бесконтактность метода, возможность контроля структуры металла и геометрических параметров проката.

Исследование акустического тракта – важный этап на пути создания эффективных методов и средств УЗ-контроля [12–15]. Для целей исследования и оптимизации акустического тракта электромагнитно-акустического дефектоскопа необходимо решить задачу распространения упругих волн в цилиндрических объектах при взаимодействии с дефектами различного типа. Наиболее точным, перспективным и при этом простым в реализации методом решения задачи распространения и взаимодействия с дефектами акустиче-

© Петров К. В., Башарова А. Ф., Пушина Г. Л., Недзвецкая Е. В., 2017
Работа выполнена в рамках проекта № 3.751.2015/К по госзаданию Министерства образования и науки Российской Федерации.

ских волн в цилиндрических объектах является метод численного моделирования. Современные программные средства, такие как *Comsol Multiphysics*, *ANSYS*, *CIVA*, используя метод конечных элементов и метод конечных разностей, позволяют решать поставленные задачи, не прибегая к достаточно сложным аналитическим методам решения [16]. Для решения задачи распространения упругих волн и их взаимодействия с дефектами была использована программа *Comsol Multiphysics*.

Используемые подходы

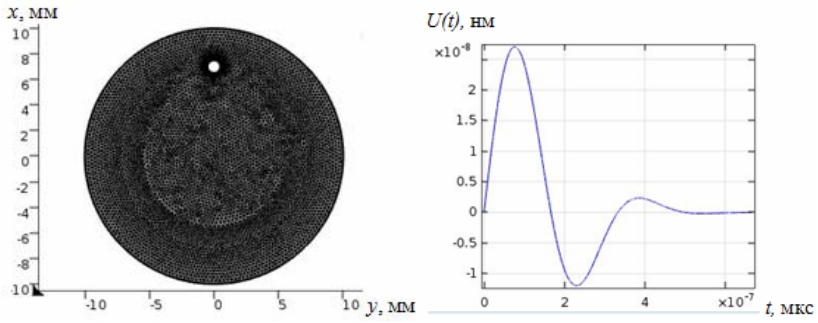
Двумерная модель сечения прутка радиусом R с дефектом в виде бокового цилиндрического отверстия представлена на рис. 1, *а*. Представленная модель позволяет исследовать распространение продольных ультразвуковых волн в радиальном направлении при их взаимодействии с дефектами.

Возбуждение ультразвуковых волн происходит посредством приложения импульса нормальных смещений U (рис. 1, *б*), распределенных равномерно по поверхности прутка:

$$U(t) = U_0 \sin(\omega t) e^{-(\beta t)^2}, \qquad (1)$$

где U_0 – начальное смещение; t – время; β – коэффициент затухания; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота колебаний.

Основные параметры разработанной модели указаны в таблице.



а *б*

Рис. 1. Модель исследуемого объекта с сеткой конечных элементов (*а*), форма зондирующего импульса (*б*)

Параметры разработанной модели

Параметр	Значение
Диаметр прутка D, мм	20
Скорость распространения продольной волны в объекте C, м/с	5850
Частота зондирующего импульса f, МГц	3
Амплитуда смещений U_0, нм	30
Коэффициент затухания β, 1/мкс	1,5
Электропроводность, См	$4{,}032 \cdot 10^6$
Модуль Юнга, Па	$200 \cdot 10^9$
Плотность, кг/м^3	7850
Коэффициент Пуассона	0,33
Количество элементов сетки	9828

Немаловажным моментом при решении задачи является соблюдение условия устойчивости явного численного решения: максимальный размер элемента сетки разбиения должен соответствовать определенному временному шагу при решении задачи, который выбирается из условия Куранта – Фридрихса – Леви [17]:

$$\left(C \cdot \Delta t\right) / \Delta x < 0{,}1, \qquad (2)$$

где C – скорость УЗ-волны в материале; Δt – временной шаг; Δx – пространственный шаг (шаг сетки конечных элементов).

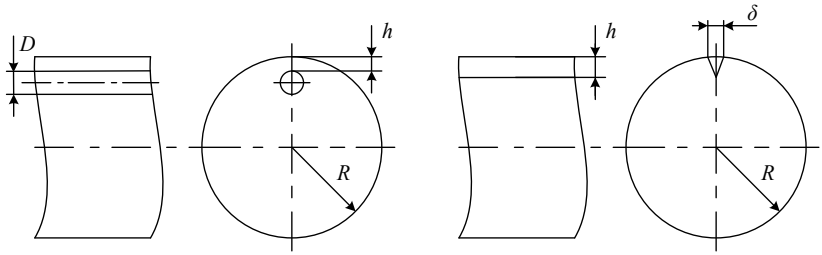
В представленной модели для заданных параметров возбуждения максимальный размер конечного элемента составил 0,3 нм, при этом шаг по времени составил 0,39 мкс.

Результаты и обсуждение

Для моделирования были выбраны дефекты в виде бокового цилиндрического отверстия диаметром D = 1 мм и трещина с шириной раскрытия δ = 0,2 мм. Расположение бокового цилиндрического сверления показано на рис. 2, *а*, глубина расположения отверстия h изменялась в пределах от 0 до 4 мм с шагом 1 мм. Расположение трещины показано на рис. 2, *б*, глубина залегания трещины h изменялась от 1 до 3 мм с шагом 1 мм.

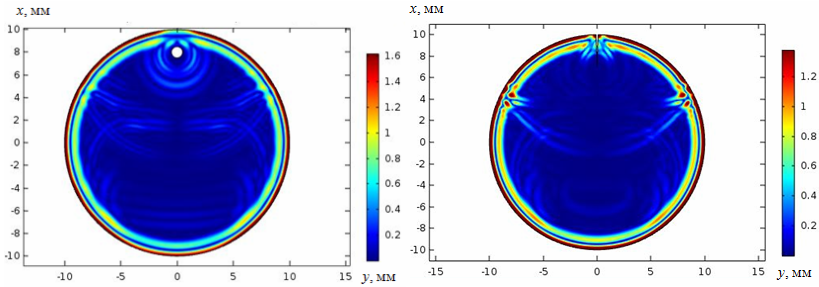
Поле распределения смещений продольной волны в различные моменты времени для прутка с дефектом в виде бокового цилиндрического отверстия (*а*) и трещины (*б*) представлено на рис. 3.

Результат моделирования в виде осциллограммы многократных отражений представлен на рис. 4. Наблюдается явное отличие осциллограммы бездефектного прутка (рис. 4, *а*) и осциллограммы для прутка, имеющего дефект в виде бокового цилиндрического отверстия на глубине 3 мм.



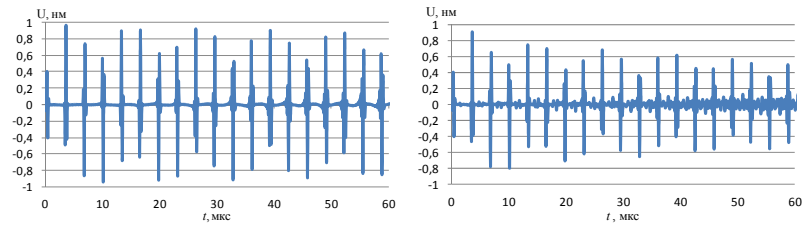
а *б*

Рис. 2. Расположение бокового цилиндрического отверстия (*а*), расположение трещины (*б*)



а *б*

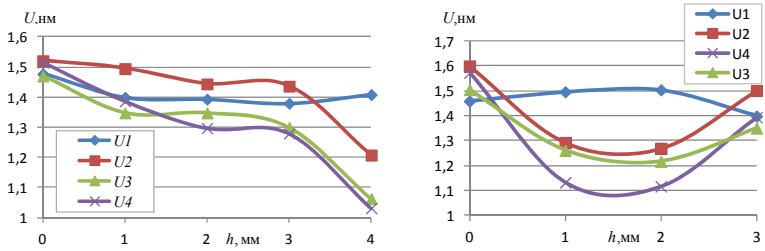
Рис. 3. Распределение смещений в продольной волне при взаимодействии с дефектом в виде бокового цилиндрического отверстия на глубине 2 мм (*а*) и трещины на глубине 3 мм (*б*)



а *б*

Рис. 4. Осциллограмма бездефектного прутка (*а*) и прутка с дефектом в виде бокового цилиндрического отверстия на глубине 3 мм (*б*)

По результатам моделирования был составлен график изменения амплитуд первых четырех эхоимпульсов при различной глубине залегания бокового отверстия (рис. 5, *а*) и при различной глубине трещины (рис 5, *б*).



а *б*

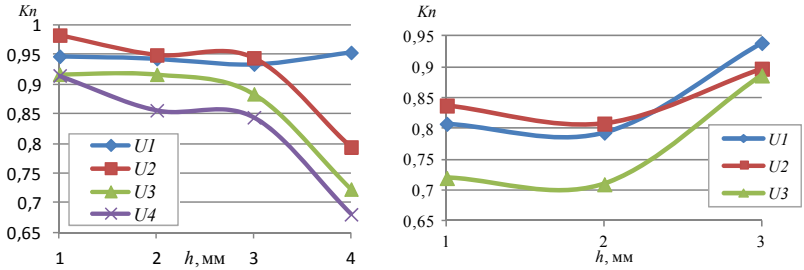
Рис. 5. Зависимость ослабления серии многократных отражений: от глубины залегания бокового цилиндрического сверления (*а*); от глубины трещины (*б*)

Для анализа акустического тракта был использован коэффициент выявляемости дефекта K_n, рассчитываемый как отношение амплитуд эхоимпульсов в бездефектном прутке и в прутке с дефектом для *n*-го отражения:

$$K_n = \frac{u_n}{U_n}, \qquad (3)$$

где u_n – импульс в прутке с дефектом; U_n – импульс в прутке без дефекта.

График изменения коэффициента выявляемости дефектов на различной глубине представлен на рис. 6.



а *б*

Рис. 6. Коэффициент выявляемости дефекта K_n на различной глубине залегания бокового отверстия (*а*) и трещины (*б*)

Коэффициент выявляемости для дефекта в виде бокового цилиндрического отверстия имеет нелинейную зависимость от глубины залегания и уменьшается при приближении дефекта к центру сечения. Для дефекта в виде трещины наблюдается иная зависимость: минимальное значения коэффициента выявляемости дефекта характерно для трещины глубиной залегания 2 мм; для трещины глубиной залегания 1 мм K_n незначительно выше, максимальное значение K_n наблюдается при глубине трещины 3 мм.

Выводы

С помощью разработанной модели распространения ультразвуковых волн и взаимодействия их с дефектами была изучена чувствительность электромагнитно-акустического метода контроля прутков на многократных отражениях к дефектам различного типа на различной глубине залегания. Выявлено, что наименьшая чувствительность к дефектам в виде бокового цилиндрического отверстия наблюдается вблизи поверхности прутка, в центральной области чувствительность резко возрастает, что связано с эффектом фокусировки. Для дефекта в виде трещины наибольшая чувствительность характерна при глубине залегания 2 мм, для трещины, расположенной вблизи поверхности, чувствительность несколько ниже, наименьшая чувствительность характерна для трещины глубиной залегания 3 мм.

Список литературы

1. *Бабкин*, *С. Э.* Определение коэффициента Пуассона ферромагнитных материалов ЭМА-способом // Дефектоскопия. – 2015. – № 5. – С. 51–55.

2. Оценка остаточных напряжений в рельсах с использованием электромагнитно-акустического способа ввода-приема волн / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, В. Е. Громов, А. М. Глезер // Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 12. –С. 34–37.

3. Электромагнитно-акустический преобразователь с импульсным подмагничиванием / А. В. Михайлов, Ю. Л. Гобов, Я. Г. Смородинский, С. В. Щербинин // Дефектоскопия. – 2015 – № 8. – С. 14–23.

4. *Муравьев*, *В. В*. Контроль качества термической обработки прутков из стали 60С2А электромагнитно-акустическим методом / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, Е. Н. Кокорина // Дефектоскопия. – 2012. – № 1. – С. 20.

5. 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.

6. *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.

7. *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.

8. *Муравьев*, *В. В*. Оценка величины натяга бандажей локомотивных колес методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова // Дефектоскопия. – 2013. – № 9. – С. 40–46.

9. *Злобин*, *Д. В*. Особенности построения аппаратуры электромагнитно-акустической дефектоскопии пруткового проката с использованием стержневых волн / Д. В. Злобин, О. В. Муравьева // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2012. – № 4(56). – С. 99–104.

10. 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.

11. *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. 22–24.

12. *Базулин*, *Е. Г*. Ультразвуковой контроль на однократно отраженном луче с использованием прореженных антенных решеток и трехмерной обработки эхосигналов // Дефектоскопия. – 2016. – № 1. – С. 3–17.

13. *Базулин*, *Е. Г*. Восстановление изображения отражателей в неоднородной изотропной среде при проведении ультразвукового контроля // Дефектоскопия. – 2016. – № 8. – С. 9–29.

14. *Муравьев*, *В. В*. Анализ факторов, влияющих на результаты контроля зеркально-теневым методом / В. В. Муравьев, О. В. Коробейникова, М. Б. Кадикова // Дефектоскопия. – 2007. – № 9. – С. 44–54.

15. *Муравьева*, *О. В*. Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневого электромагнитно-акустического метода контроля прутков / О. В. Муравьева, М. Ю. Соков // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2016. – № 3. – С. 46–50.

16. *Петров*, *К. В*. Моделирование магнитного поля и поля вихревых токов проходного преобразователя в программной среде COMSOL MULTIPHYSICS / К. В. Петров, О. В. Муравьева, Д. А. Егоров // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : электрон. науч. изд. : сб. тр. IV Всерос. науч.-техн. конф. асп., магистр. и молодых ученых с междунар. участием (Ижевск, 20–21 апр. 2016 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова 2016. – С. 374–379.

17. *Вержбицкий*, *В. М*. Численные методы математической физики : учеб. пособие. – М. : Директ-Медиа, 2013. – 212 с.

Simulation of Acoustic Wave Propagation in Cylindrical Objects with Defects in Comsol Multiphysics

The paper presents the results of a simulation of acoustic wave propagation in a cylindrical object in the presence or absence of defects in the form of cylindrical side holes and cracks. The coefficients of detection of defects were calculated at the different depth.

Keywords: mirror through technique; electromagnetic acoustic; numerical modeling; interaction with defects

УДК 620.179.16

К. В. Петров, аспирант
Г. Л. Пушина, студентка
А. Ф. Башарова, студентка
В. С. Стрелков, студент
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Моделирование формирования акустического поля проходного электромагнитно-акустического преобразователя в *COMSOL Multiphysics*

Предложен подход к моделированию влияния рабочей частоты на акустическое поле проходного электромагнитно-акустического преобразователя методом конечных элементов в программной среде COMSOL Multiphysics. Получены результаты моделирования акустического поля в прутке. Показано влияние рабочей частоты на некоторые параметры акустического поля, а именно: эпюра смещений, коэффициент фокусировки и зона фокусировки.

Ключевые слова: моделирование; электромагнитно-акустический преобразователь; эпюра смещений; фокусировка акустических волн

Введение

Электромагнитно-акустические (ЭМА) преобразователи широко используются при ультразвуковой (УЗ) толщинометрии и структуроскопии металлов благодаря бесконтактной природе возбуждения и приема УЗ волн [1–7]. Однако сравнительно низкая эффективность ЭМА преобразования затрудняет их применение при дефектоскопии, где требуется обнаружение достаточно малых сигналов на уровне шума. Использование проходных ЭМА-преобразователей – один из эффективных способов решения задач неразрушающего контроля изделий цилиндрической формы [8–12]. Ввиду того, что проходной ЭМА-преобразователь формирует акустические волны с фокусировкой по центру, его акустическое поле не соответствует общепринятым представлениям о формировании диаграмм направленности плоских преобразователей и не может быть рассчитано с использованием классических подходов к расчету диаграмм направленности.

Одним из наиболее эффективных и прогрессивных подходов к такого рода исследованиям является численное моделирование в спе-

© Петров К. В., Пушина Г. Л., Башарова А. Ф., Стрелков В. С., 2017
Работа выполнена в рамках проекта № 15-19-00051 Российского научного фонда.

циализированных программных средах [13]. Для моделирования методом конечных элементов широко используется программная среда *COMSOL Multiphysics*, которая является универсальной программной платформой для компьютерного моделирования физических задач, в том числе связанных или «мультифизических» явлений.

Используемые подходы

Принцип действия проходного ЭМА-преобразователя основан на электродинамическом механизме взаимодействия. Он содержит соосный с прутком цилиндрический высокочастотный индуктор с током и источник поля подмагничивания [14]. Полагаем, что ЭМА-преобразователь излучает продольную волну во всех радиальных направлениях (перпендикулярно оси прутка), что обеспечивается за счет ориентации поля подмагничивания в осевом направлении в приповерхностной области прутка по отношению к направлению вихревых токов.

Возбуждение волн происходит за счет воздействия импульса нормальных смещений U, равномерно распределенных по периметру прутка. Вид импульса смещений представлен на рис. 1 и задается формулой

$$U(t) = U_0 \sin(\omega t) e^{-(\beta t)^2}, \qquad (1)$$

где U_0 – начальное смещение; t – время; β – коэффициент затухания, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота колебаний.

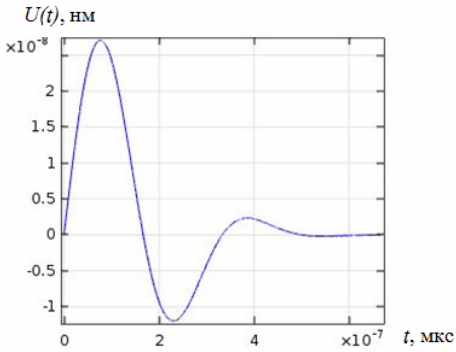


Рис. 1. Форма зондирующего импульса

В качестве начальных условий использованы функции смещений, описываемые в явном виде формулами:

$$t < 3 \cdot T_0 \cdot U(t) \cdot y / R; \quad (2)$$

$$t < 3 \cdot T_0 \cdot U(t) \cdot x / R, \quad (3)$$

где t – время; T_0 – период колебаний; $U(t)$ – смещение; R – радиус прутка; x, y – координаты.

Временной интервал моделирования распространения УЗ-импульса по сечению прутка составляет 50 мкс. Материалом прутка является конструкционная низколегированная сталь марки 09Г2С. Основные параметры разработанной модели приведены в таблице.

Основные параметры разработанной модели

Параметр	Значение
Плотность ρ, кг/м^3	7850
Постоянные Ламе, Па	$\lambda = 1{,}5 \times 10^{11}$
	$\mu = 7{,}5 \times 10^{10}$
Модуль Юнга E, Па	200×10^9
Коэффициент Пуассона	0,33
Амплитуда смещений U_0,нм	300
Коэффициент затухания β, 1/мкс	1,5
Радиус объекта R, мм	10
Период колебаний T_0, с$^{-1}$	$3{,}33 \times 10^7$
Скорость УЗ-волны в материале C, м/с	5850

Для корректного решения задачи необходимо учитывать ряд особенностей: при построении сетки конечных элементов максимальный размер элемента не должен превышать 0,3 нм, а временной шаг моделирования должен определяться по критерию Куранта – Фридрихса – Леви, который выражает собой необходимое условие устойчивости явного численного решения и задается формулой [15]:

$$(C \cdot \Delta t) / \Delta x < 0{,}1, \quad (4)$$

где C – скорость УЗ-волны в материале; Δt – временной шаг; Δx – пространственный шаг (шаг сетки конечных элементов).

Для решения поставленной задачи была построена конечно-элементная модель поперечного сечения прутка радиусом R (рис. 2).

При максимальном размере элемента 0,3 нм шаг по времени составляет 0,39 мкс. Модель разбивается на 9869 конечных элементов.

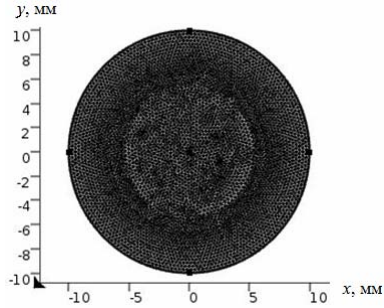


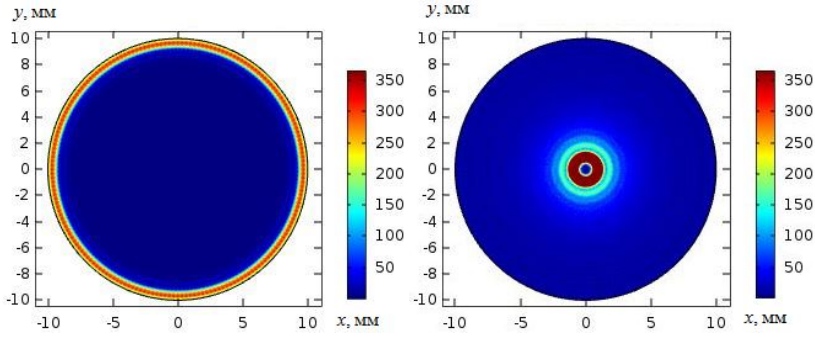
Рис. 2. Модель задачи с сеткой конечных элементов

Результаты и обсуждение

Одним из ключевых параметров, влияющих на формирование акустического поля проходного ЭМА-преобразователя, является его рабочая частота, от которой напрямую зависит чувствительность и разрешающая способность преобразователя. Как правило, низкая частота является причиной низкой чувствительности и недостаточной разрешающей способности. С другой стороны, высокая частота приводит к высокому затуханию и рассеиванию волн, что значительно уменьшает количество переотражений импульса на осциллограмме. Область рабочих частот при ультразвуковом контроле с использованием проходных ЭМА преобразователей лежит в диапазоне от 1 до 5 МГц. Распределение смещений по сечению прутка в различные моменты времени (максимум на поверхности и в фокусе) показаны на рис. 3. Эпюры смещений в продольной волне по диаметру прутка при различных частотах зондирующего импульса представлены на рис. 4.

Видно, что в центральной области амплитуда смещений возрастает. Введем понятие коэффициента фокусировки $K_ф$, определяемое как отношение максимальной амплитуды смещений в зоне фокуса к амплитуде смещений, возникающих на поверхности прутка в начальный момент времени. С ростом частоты наблюдается повышение коэффициента фокусировки, однако при этом уменьшается размер фокусного пятна. Согласно рис. 4 для f_p = 1 МГц коэффициент фокусировки $K_ф$ = 3,5, для f_p = 3 МГц – $K_ф$ = 5,9, для f_p = 5 МГц – $K_ф$ = 7,7.

За размер фокусного пятна принято расстояние от центра прутка, на котором амплитуда смещений уменьшается на 6 дБ (в 2 раза) относительно максимального значения. При частоте зондирующего импульса f_p = 1 МГц фокусное пятно имеет радиус $r_ф$ = 2,32 мм, при f_p = 3 МГц – $r_ф$ = 0,74 мм, при f_p = 5 МГц – $r_ф$ = 0,47 мм.



а *б*

Рис. 3. Результат моделирования волнового фронта волны на частоте 3 МГц: *а* – 0,13 мкс, *б* – 1,81 мкс

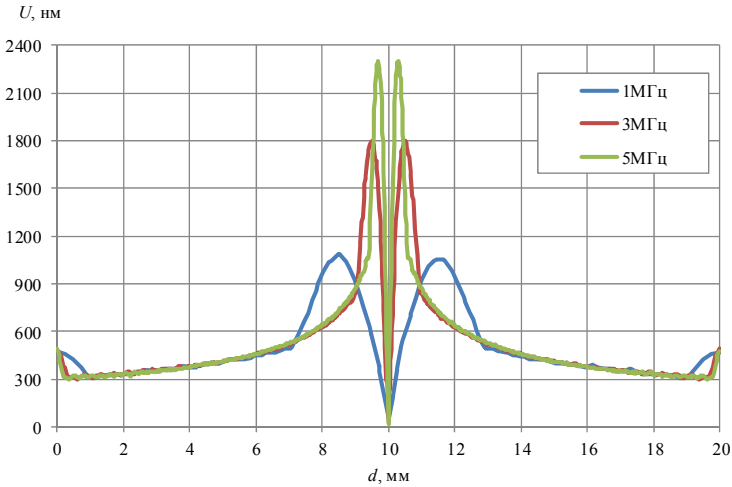


Рис. 4. Эпюры смещений на разных частотах

Выводы

Результаты моделирования и исследования процесса распространения продольных УЗ-волн, излучаемых проходным ЭМА-преобразователем, по радиальным направлениям сечения прутка показали существенное влияние рабочей частоты на акустическое поле, коэффициент фокусировки и размер фокусного пятна. Полученные результаты могут

быть использованы для выбора оптимальной рабочей частоты проходных ЭМА-преобразователей, при этом на высоких рабочих частотах (3–5 МГц) обеспечивается наибольшая чувствительность к небольшим дефектам, расположенным в центральной части прутка; на низких рабочих частотах (1–2 МГц) обеспечивается более равномерная чувствительность к дефектам, расположенным на различной глубине.

Список литературы

1. *Бабкин*, *С. Э.* Определение коэффициента Пуассона ферромагнитных материалов ЭМА-способом // Дефектоскопия. – 2015. – № 5. – С. 51–55.

2. Электромагнитно-акустический преобразователь с импульсным подмагничиванием / А. В. Михайлов, Ю. Л. Гобов, Я. Г. Смородинский, С. В. Щербинин // Дефектоскопия. – 2015. – № 8. – С. 14–23.

3. *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.

4. *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.

5. 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.

6. *Муравьев*, *В. В.* Оценка величины натяга бандажей локомотивных колес методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова // Дефектоскопия. – 2013. – № 9. – С. 40–46.

7. *Злобин*, *Д. В.* Особенности построения аппаратуры электромагнитно-акустической дефектоскопии пруткового проката с использованием стержневых волн / Д. В. Злобин, О. В. Муравьева // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2012. – № 4(56). – С. 099–104.

8. Анализ сравнительной достоверности акустических методов контроля пруткового проката из рессорно-пружинных сталей / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Е. Н. Фокеева // Дефектоскопия. – 2014. – № 8. – С. 3–12.

9. *Муравьев*, *В. В.* Контроль качества термической обработки прутков из стали 60С2А электромагнитно-акустическим методом / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, Е. Н. Кокорина // Дефектоскопия. – 2012. – № 1. – С. 20–32.

10. *Муравьева*, *О. В.* Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневого электромагнитно-акустического метода контроля прутков / О. В. Муравьева, М. Ю. Соков // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2016. – № 3. – С. 46–50.

11. *Муравьева*, *О. В.* Вероятностно-статистические параметры сигнала при контроле цилиндрических объектов зеркально-теневым методом многократ-

ных отражений / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Габбасова // Дефектоскопия. – 2015. – № 12. – С. 22–24.

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.

13. *Петров*, *К. В*. Моделирование магнитного поля и поля вихревых токов проходного преобразователя в программной среде COMSOL MULTIPHYSICS / К. В. Петров, О. В. Муравьева, Д. А. Егоров // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : электрон. науч. изд. : сб. тр. IV Всерос. науч.-техн. конф. асп., магистр. и молодых ученых с междунар. участием (Ижевск, 20–21 апр. 2016 г.). – Ижевск, 2016. – С. 374–379.

14. Оптимизация систем подмагничивания проходных электромагнитно-акустических преобразователей объемных волн для неразрушающего контроля пруткового проката / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, Е. Н. Кокорина, В. Д. Стерхов, Д. В. Малютин // Датчики и системы. – 2013. – № 2(165). – С. 2–9.

15. *Вержбицкий*, *В. М*. Численные методы математической физики : учеб. пособие. – М. : Директ-Медиа, 2013. – 212 с.

Simulation of the Acoustic Field Formation of EMAT in Comsol Multiphysics

The approaches and results of numerical simulation of the influence of the operational frequency on the acoustic field of the through type electromagnetic-acoustic transducer in software platform called COMSOL Multiphysics are presented in this article. The influence of operational frequency on some parameters of the acoustic field such as displacement diagram, focusing coefficient and focusing field was also presented.

Keywords: simulation; electromagnetic-acoustic transducer; displacement diagram; acoustic wave focusing

УДК 621.391

О. В. Пономарева, кандидат технических наук, доцент
E-mail: pmkk@istu
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Динамическое измерение коэффициентов параметрического дискретного преобразования Фурье с частотой дискретизации сигнала

Предложен алгоритм динамического измерения заданных коэффициентов параметрического дискретного преобразования Фурье дискретного сигнала с частотой его дискретизации, который представляет собой обобщение модифицированного алгоритма Гёрцеля (Goertzel algorithm).

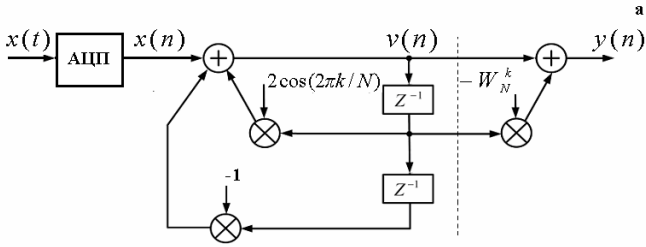
Ключевые слова: дискретный сигнал; параметрическое дискретное преобразование Фурье; модифицированный алгоритм Гёрцеля; БИХ-фильтр

Введение

Приложения технологии *DTMF* (*Dual-Tone Multi-Frequency*, *DTMF*) сигналов весьма обширны. Данная технология используется при наборе телефонного номера, в телекоммуникациях для осуществления взаимодействия различных технических устройств друг с другом (*телефонная сигнализация*), в различных интерактивных системах, например, голосового автоответа (*DISA* или *IVR*), а также в системах умного дома, охранных и тревожных сигнализациях. При этом решение задач детектирования и декодирования *DTMF*-сигналов осуществляется, как правило, на основе алгоритма Гёрцеля (*Goertzel algorithm*) (предложен Джеральдом Гёрцелем в 1958 г. [1]) или его модификации [2]. Однако развитие и совершенствование методов и алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) открывает возможности пересмотра устоявшихся подходов к решению задач детектирования и декодирования *DTMF*-сигналов. Так, в 1965 г. был предложен алгоритм быстрого вычисления дискретного преобразования Фурье (алгоритм БПФ) [3], а в 1984 г. предложено новое преобразование – параметрическое дискретное преобразования Фурье (ДПФ-П) и алгоритм быстрого его вычисления (алгоритм БПФ-П) [4]. Аналитические и стохастические свойства ДПФ-П, его приложения в различных областях научных исследований, а также алгоритмы БПФ-П подробно рассмотрены в работах [5–24].

© Пономарева О. В., 2017

При ЦОС на конечных интервалах в частотной области (в том числе и при решенib задач детектирования и декодирования *DTMF*-сигналов) применение ДПФ, даже реализуемого алгоритмами БПФ, становится крайне неэффективным, т. к. большинство значений спектра оказываются невостребованными. Эффективным методом цифровой обработки спектров на определенных частотах является алгоритм Гёрцеля (называемый также фильтром Гёрцеля), который позволяет измерять конкретный бин ДПФ сигнала длительностью в N отсчетов. Алгоритм Гёрцеля реализуется в виде БИХ-фильтра (рис. 1) второго порядка с двумя действительными коэффициентами обратной связи (слева от пунктирной линии) и одним комплексным коэффициентом в цепи прямой связи (справа от пунктирной линии). Отметим, что только в момент времени $n = N$ выходной отсчет $y(n)$ фильтра Гёрцеля равен k-му бину ДПФ. Другими словами, фильтр Гёрцеля применяется не как традиционный фильтр и измерение k-го бина ДПФ проводится только после поступления блока в N отсчетов, т. е. осуществляется ***статическое измерение***.



$0 \le \theta < 1$, z^{-q} – задержка на q отсчетов

Рис. 1. Структуры БИХ-фильтров, реализующих алгоритм Гёрцеля

Модифицированный алгоритм Гёрцеля позволяет измерять заданный коэффициент (бин) дискретного преобразования Фурье (ДПФ) (его амплитуду и фазу) с частотой прихода входных отсчетов сигнала в скользящем окне длительностью N отсчетов т. е. осуществлять ***динамическое измерение***. Модифицированный алгоритм Гёрцеля реализуется БИХ-фильтром (рис. 2) с разностным уравнением вида:

$$S_N^k(n) = W_N^{-k}\left[S_N^k(n-1) + x(n) - x(n-N)\right], \qquad (1)$$

где $S_N^k(n)$ значение k-го бина N-точечного ДПФ в момент времени n:

$$S_N^k(n) = \frac{1}{N}\sum_{p=0}^{N-1} x(n+p)W_N^{kp}; \quad W_N = \exp\left(-j\frac{2\pi}{N}\right), \tag{2}$$

где $k = \overline{0,(N-1)}$ $x(n+p)$ – дискретный сигнал, $p = \overline{0,N-1}$ $n = 0, 1, 2, 3, \ldots$.

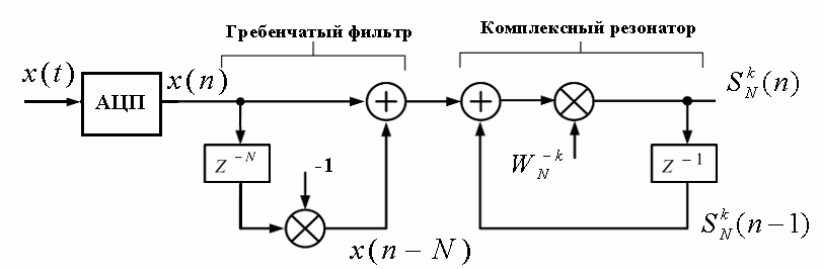


Рис. 2. Структура БИХ-фильтра, реализующего модифицированный алгоритм Гёрцеля

Отметим, что обе структуры фильтров (алгоритм Гёрцеля и модифицированный алгоритм Гёрцеля) обладают одним существенным недостатком: они позволяют измерять спектр только на частотах (или подмножестве частот) из фиксированного множества частот: $2\pi k/N$, $k = \overline{0,(N-1)}$, что существенно ограничивает их практическое применение в ЦОС.

Рассмотрим обобщение модифицированного алгоритма Гёрцеля, основанного на параметрическом дискретном преобразовании Фурье (назовем его ***обобщенным алгоритмом Гёрцеля***), который позволяет: рекуррентно вычислять значение *k*-го бина *N*-точечного ДПФ-П из скользящего окна в *N* отсчетов. Обобщенный алгоритм Гёрцеля, в отличие от модифицированного алгоритма Гёрцеля, дает возможность проводить измерение спектра в окне в *N* отсчетов не на фиксированных частотах, а из набора частот, число которых варьируется параметром θ: $\{2\pi(k+\theta)/N\}$; где $k = \overline{0,N-1}$, $0 \le \theta < 1$, осуществляя при этом ***динамические измерения.***

Обобщенный алгоритм Гёрцеля позволяет обрабатывать значения спектра $S_N^{(k+\theta)}(n)$ на $(k+\theta)$ частоте по отсчетам входного сигнала

$x(n+p)$, $n=\overline{0,N-1}$, из скользящего окна длиной в N отсчетов, при сдвиге сигнала в окне на n отсчетов влево:

$$S_N^{(k+\theta)}(n)=\frac{1}{N}\sum_{p=0}^{N-1}x(n+p)W_N^{(k+\theta)p},\quad 0\le\theta<1. \tag{3}$$

Можно показать, что обобщенный алгоритм Гёрцеля реализуется БИХ-фильтром (рис. 3) с разностным уравнением вида:

$$S_N^{(k+\theta)}(n)=W_N^{-(k+\theta)}\left[S_N^{(k+\theta)}(n-1)+x(n)-x(n-N)\exp(-j2\pi\theta)\right]. \tag{4}$$

где $S_N^{(k+\theta)}(n)$ значение $(k+\theta)$-го бина N-точечного ДПФ-П в момент времени n:

$$S_N^{(k+\theta)}(n)=\frac{1}{N}\sum_{p=0}^{N-1}x(n+p)W_N^{(k+\theta)p};\quad 0\le\theta<1. \tag{5}$$

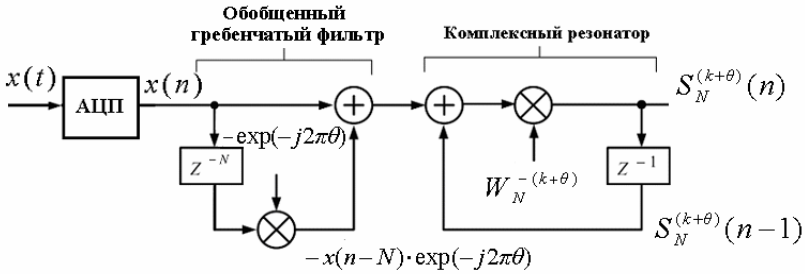


Рис. 3. Структура БИХ-фильтра, реализующего обобщенный алгоритм Гёрцеля

Выводы

Предложено обобщение модифицированного алгоритма Гёрцеля, который позволяет проводить динамические измерения заданных коэффициентов параметрического дискретного преобразования дискретного сигнала с частотой дискретизации.

Список литературы

1. *Goertzel*, *G*. An Algorithm for the Evaluation of Finite Trigonometric Serie // American Mathematical Monthly. – Vol. 65. – Jan. 1958. – Pp. 34–35.

2. *Лайонс*, *Р*. Цифровая обработка сигналов. – 2-е изд. / пер. с англ. – М. : ООО «Бином-Пресс», 2006. – 636 с.

3. *Cooley*, *James W*. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series / James W. Cooley, John W. Tukey. – Math. Comput. – 1965, April. – V. 19. – Pp. 297–301.

4. *Пономарев*, *В. А*. Модификация дискретного преобразования Фурье для решения задач интерполяции и свертки функций / В. А. Пономарев, О. В. Пономарев // Радиотехника и электроника. АН СССР. – 1984. – Т. 29. № 8. – С. 1561–1570.

5. *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.

6. *Пономарева*, *О. В*. Неинвариантность скользящего энергетического параметрического фурье-спектра действительных тональных сигналов // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 2. – С. 7–14.

7. *Пономарева*, *О. В*. Быстрое параметрическое дискретное преобразование Фурье действительных последовательностей // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 2. – С. 2–5.

8. *Пономарева*, *О. В*. Измерение временных спектров дискретных сигналов методом модифицированного параметрического дискретного преобразования Фурье // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2(24). – С. 132–138.

9. *Пономарева*, *О. В*. Иерархическая морфологическо – информационная модель системы функционального диагностирования объектов на основе цифровой обработки сигналов / О. В. Пономарева, В. А. Пономарев, А. В. Пономарев // Датчики и системы. – 2014. – № 1(176). – С. 2–8.

10. *Пономарева*, *О. В.* Метод быстрого вычисления дискретного преобразования Фурье действительных последовательностей / О. В. Пономарева, А. В. Пономарев, Н. В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2013. – № 2. – С. 10–15.

11. *Пономарева*, *О. В*. Цифровой периодограммanализ и проблемы его практического применения / О. В. Пономарева, В. А. Алексеев, А. В. Пономарев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2013. – № 2(58). – С. 130–133.

12. *Пономарева*, *О. В*. Обобщение алгоритма Герцеля для решения задач выявления скрытых периодичностей / О. В. Пономарева, А. В. Пономарев, В. А. Пономарев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1(21). – С. 41–46.

13. *Пономарева*, *О. В*. Быстрое параметрическое дискретное преобразование Фурье действительных последовательностей // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 2. – С. 2–5.

14. *Пономарева*, *О. В*. Модификация фильтра на основе частотной выборки для решения задач цифровой обработки случайных процессов со скрытыми периодичностями / О. В. Пономарева, Н. В. Пономарева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 2(20). – С. 122–129.

15. *Пономарева*, *О. В*. Применение временных окон в векторном анализе дискретных сигналов / О. В. Пономарева, Н. В. Пономарева, В. Ю. Пономарева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 2(29). – С. 19–21.

16. Пономарев, *В. А*. Метод эффективного измерения скользящего параметрического спектра Фурье / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева, А. В. Пономарев // Автометрия. – 2014. – Т. 50. – № 2. – С. 31–38.

17. Обобщение алгоритмов Гёрцеля и скользящего параметрического дискретного преобразования Фурье / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева, А. В. Пономарев, Н. В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 1. – С. 3–11.

18. *Пономарева*, *О. В*. Измерение спектров комплексных сигналов на конечных интервалах методом апериодического дискретного преобразования Фурье // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 1(23). – С. 100–107.

19. *Пономарева*, *О. В*. Измерение скользящего взвешенного энергетического дискретно-временного спектра тональных компонент / О. В. Пономарева, А. В. Пономарев, В. А. Пономарев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2(24). – С. 126–132.

20. *Пономарев*, *В. А*. Инвариантность текущего энергетического спектра Фурье комплексных дискретных сигналов на конечных интервалах / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева // Изв. высш. учеб. завед. России. Радиоэлектроника. – 2014. – Вып. 2. – С. 8–16.

21. *Пономарев*, *В. А*. Инвариантность текущего энергетического фурье-спектра действительных дискретных сигналов на конечных интервалах / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2014. – № 1. – С. 15–21.

22. *Пономарева*, *О. 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.

23. *Пономарева*, *О. В.* Развитие теории спектрального анализа дискретных сигналов на конечных интервалах в базисе параметрических экспоненциальных функций // Цифровая обработка сигналов. – 2010. – № 2. – С. 7–11.

24. *Алексеев*, *В. А*. Методология определения погрешностей измерения вероятностных характеристик случайных процессов, реализуемых процессорными измерительными средствами / В. А. Алексеев, В. А. Пономарев, О. В. Пономарева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2(16). – С. 91–99.

Dynamic Measurement of Parametric Discrete Fourier Transform Coefficients Using Signal Discretization Frequency

An algorithm for the dynamic measurement of the specific coefficients *of parametric discrete Fourier transform of a discrete signal with the frequency of its* discretization. This algorithm *is a generalization of the modified Goertzel algorithm.*

Keywords: discrete signal; parametric discrete Fourier transform; modified Goertzel algorithm; IIR filter

УДК 543.552

В. А. Руденок, кандидат химических наук, зав. кафедрой
E-mail: rudenva@rambler.ru
Ижевская государственная сельскохозяйственная академия

Твердотельный полярограф

Представлено новое устройство для полярографического исследования состава растворов путем измерения распределения потенциалов и интенсивности протекающих процессов по длине протяженного электрода (полярограммы), состоящее из экспериментальной и электрохимической ячеек. Электрод в электрохимической ячейке поляризуется до потенциала, соответствующего значению потенциала в фиксированной точке протяженного электрода, поляризуемого в измерительной ячейке по биполярной схеме.

Ключевые слова: биполярная поляризация; измерение распределения потенциалов

Введение

Полярографические методы анализа растворов успешно применяются для выполнения аналитических измерений в исследовательских и промышленных лабораториях. Они позволяют определять одновременно несколько веществ, входящих в состав раствора, отличаются хорошей чувствительностью и воспроизводимостью результатов. В то же время работа с ртутной падающей каплей, положенная в основу метода, требует использования специальных приемов подавления искажений, проявляющихся в виде полярографических максимумов, вызванных течением ртути внутри растущей капли и на ее поверхности. Существенным является также вопрос экологической безопасности при работе с ртутью.

Описание схемы устройства

В статье рассматривается устройство для измерения распределения потенциалов и интенсивности протекающих процессов по длине протяженного электрода, состоящее из экспериментальной ячейки *2* (рис. 1), содержащей исследуемый электрод *7*, и электрохимической ячейки *1*, включающей рабочий *10* и вспомогательный *11* электроды. Электрохимическая и экспериментальная ячейки соединены солевым мостиком *13*. В ячейке *2* расположен индикаторный электрод *7* и уст-

© Руденок В. А., 2017

ройство для равномерного перемещения электрода сравнения (хлорсеребряного электрода – ХСЭ) *9* вдоль его поверхности. Электрод *9* подключен к клемме «электрод сравнения» на входе потенциостата. В электрохимическую ячейку *1* введен электрод сравнения *12*, подключенный к вольтметру *4*. Потенциометр *6* регистрирует потенциал рабочего электрода *10*; потенциометр *5* регистрирует силу тока его поляризации [1].

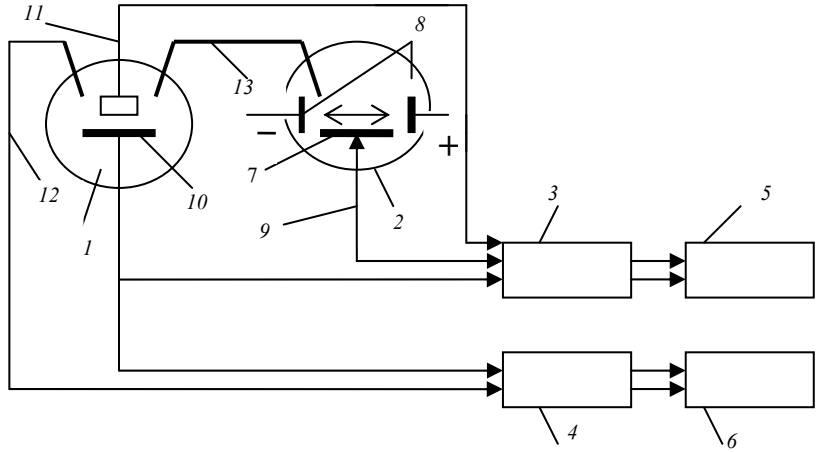


Рис. 1. Блок-схема твердотельного полярографа: *1* – электрохимическая ячейка; *2* – экспериментальная ячейка; *3* – потенциостат; *4* – вольтметр; *5* и *6* – самописцы; *7* – протяженный платиновый (индикаторный) электрод; *8* – дополнительные электроды из инертного материала, присоединенные к регулируемому источнику постоянного тока (не показан); *9* – электрод сравнения; *10* – платиновый электрод; *11* – вспомогательный платиновый электрод; *12* – электрод сравнения; *13* –электролитический ключ. Электрод *10* подключен к клемме на колодке потенциостата «рабочий электрод»; *11* – «вспомогательный электрод»; *9* – «электрод сравнения»

Процесс измерения сводится к биполярной поляризации протяженного платинового проволочного электрода *7*, натянутого в горизонтальном положении в исследуемом растворе вблизи его поверхности. Поляризация производится при помощи двух дополнительных электродов *8*, расположенных у концов электрода *7*. Сила поляризующего тока от внешнего источника выбирается исходя из конкретных задач измерения. По поверхности проволочного электрода с постоянной скоростью скользит своим капилляром электрод сравнения (ХСЭ) *9*.

Ток, протекающий через электрод *7* в точке касания его поверхности электродом *9*, соответствует интенсивности электрохимического процесса, установившегося в этой точке при данном потенциале. Интенсивность процесса, или плотность тока в этой точке, связана со значением электродного потенциала в ней. Ячейки подключены к потенциостату таким образом, что электрод *9* подключен к клемме «электрод сравнения» потенциостата. Электрод *10* подключен к клемме «Рабочий электрод», а электрод *11* к клемме «Вспомогательный электрод». Очевидно, электрод *7* выполняет в данной схеме подключения роль электрода сравнения. При этом конкретное значение величины электродного потенциала электрода *7* изменяется по мере перемещения по его длине электрода *9*.

Потенциостат включен в режим поддержания потенциала электрода *10*, равный потенциалу, установившемуся в точке касания протяженного электрода *7* электродом *9* [2]. Следовательно, плотность тока поляризации электрода *10* потенциостатом до заданного потенциала будет соответствовать интенсивности процесса, протекающего в этой точке. Точность выполняемых измерений будет определяться геометрическими размерами электрода *10*. Небольшие размеры электрода обеспечат одинаковое значение потенциала по всей его поверхности. Солевой мостик *13* доложен подводиться к поверхности электрода *10* настолько близко, чтобы исключить влияние на него токов поляризации, протекающих между электродами *10* и *11*.

Этот потенциал строго соответствует потенциалу электрода *10*, а последний формируется за счет тока поляризации, вырабатываемого потенциостатом [2]. Самописец *5* фиксирует эту силу тока. Поскольку электрод *9* равномерно перемещается по поверхности электрода *7*, то фактически самописец *5* фиксирует распределение интенсивности электрохимических процессов по длине проволочного электрода. Значение электродного потенциала, установившегося в этой точке, записывается как потенциал электрода *10*, при помощи вольтметра *4* и самописца *6*. Совмещение кривых, полученных на самописцах *5* и *6*, дает зависимость потенциал – сила тока для протяженного электрода (полярограмму процессов).

Выводы

Полярограф может быть полезен для изучения процессов, протекающих в водных растворах органических и неорганических соединений при проведении исследований в области аналитической химии, медицины и экологии.

Список литературы

1. Пат. 2599161 Российская Федерация. Способ измерения распределения потенциалов и интенсивности протекающих процессов по длине исследуемого электрода, и устройство для его реализации / Руденок В. А. – 2015. Бюл. № 32.
2. Пат. 1356726 Российская Федерация Способ измерения скорости коррозии основы в порах катодного гальванического покрытия / Руденок В. А., Бахчисарайцьян Н. Г., Кругликов С. С. – 1987. Бюл. № 44.

Polarograph with Solid Electrode

Polarograph with solid working electrode included two electrolytic cells: one is a polarographic cell and the other is used to control the potential of working electrode. Inside this cell there is a long wire, actings as a bipolar electrode and a sliding contact composed of a reference electrode connected with the electric circuit which changes the voltage applied to a working electrode and to a counterelectrode.

Keywords: bipolar polarization; measurement of potentials distribution

УДК 519, 53.06, 616.24

В. А. Степанов, кандидат технических наук, зав. лабораторией
E-mail: vladimir1@udm.ru
В. В. Белых, кандидат технических наук, доцент
E-mail: bil_ha@mail.ru

Метод картирования результатов фрактального анализа флюорограмм органов грудной клетки человека

Приведена методика оценки информации изображения посредством определения координат центра тяжести спектра фрактальных размерностей флюорограмм легкого при различных заболеваниях. Оценка информационного статуса 199 пациентов поликлиники, проходящих флюорографию легкого, позволяет составить диагностическую карту функциональных состояний на основе построения диаграмм Воронова. Статья предназначена для специалистов информационной технологии обработки изображений.

Ключевые слова: фрактал; мультифрактал; флюорография; рентгенограмма; диагностика; диаграмма Воронова; скрининг; центр тяжести; информация; спектр

Введение

Организм человека – динамическая самоорганизующаяся система, ее устойчивость (поддержание гомеостаза) обеспечивается непрерывным функционированием различных физиологических систем, непрерывно обменивающихся энергоинформационными потоками с окружающей средой [1]. Для диагностики и анализа состояний исследуемых объектов в медицине и биологии применяется метод динамического картирования физических полей биологических объектов [2–6].

В широком понимании, картирование является методом описания, систематизации материального и абстрактного объекта, позволяющего группировать и обобщать исходные данные для построения моделей объектов [7]. Картирование как вид моделирования, основанного на принципе подобия, выступает как частный метод познания в природе (фрактальное самоподобие), а сам процесс заключается в получении образов окружающего мира, являющихся фракталами [8]. Фрактальный анализ структуры различных материалов живой и неживой природы выявляет спектры обобщенных размерностей Реньи, определяю-

© Степанов В. А., Белых В. В., 2017

щих информационные энтропии D_q, где q – целочисленный индекс принимает значения от –40 до 40 [9].

Фрактальный подход и компьютерная программа обработки рентгенограмм (флюорограмм) позволяют определить связь между структурными параметрами изображения стромы и диагнозом состояния, выявляя ранние проявления патологии органов через изменения в спектре фрактальных размерностей [10–13].

Описание метода

В настоящий момент ранняя диагностика заболевания туберкулеза легких основывается на появлении характерных изменений в оптической плотности рентгенограммы организма (рентгенологами выявляются 5 % изменения оптической плотности рентгеновской пленки). Эти изменения в строме увеличиваются с развитием заболевания, что приводит к трансформации спектра фрактальных размерностей.

Данный факт стал определяющим в создании алгоритма выявления мультифрактального спектра областей рентгенограммы (флюорограммы) (рис. 1) [11].

Рис. 1. Цифровая флюорограмма
с выделенным анализируемым оптическим слоем

При цифровой флюорографии оптическая плотность и контрастность рентгеновского объекта на ПЗС-матрице определяется сложным взаимодействием рентгеновского излучения с объектом и кристаллами ПЗС-матрицы цифрового флюорографа, создавая неоднородное мультифрактальное множество точек.

Мультифрактал – неоднородный фрактальный объект, для полного описания которого недостаточно введения одной фрактальной размерности D_o, а необходим спектр обобщенных размерностей Реньи D_q, где D_o – размерность Хаусдорфа – Безиковича; q – целочисленный параметр (масштабный коэффициент), изменяющийся от $-\infty$ до $+\infty$.

Идея мультифрактального анализа множества со сложной статистикой состоит в его разложении по множествам однородных фракталов с четко выраженной фрактальной размерностью D_o.

Размерность D_o чувствительна к «усложнению» рельефа границ объекта и содержит сжатую количественную информацию о непрерывно меняющемся множестве случайных геометрических конфигураций при его самоподобном воспроизводстве в интервале пространственных масштабов. Мультифрактальный анализ, являясь информационной технологией обработки изображения, может выявить информационную оценку мультифрактала – координаты центра тяжести его спектра, обобщенных размерностей $D_q - q$.

При обработке рентгенограмм целочисленный параметр q ограничивали интервалом от –40 до +40. Задаваемый интервал достаточен для получения основных данных о спектре при незначительных затратах вычислительного времени. В процессе проведения вычислений в программном пакете варьировались параметры:

– размер d ячейки, покрывающей изображение от 3 до 50 пикселов;

– оптическая плотность изображения (использовалось 10 оптических срезов) в интервале «серости» от 0 до 255 пикселов.

На рис. 2 поясняется образование математического облака из спектра фрактальных размерностей структуры рентгенограммы для различных оптических срезов. Центр тяжести (ЦТ) математического облака вычислялся по известным методикам расчета ЦТ [14].

Результаты расчета позволяют установить зависимость центра масс ЦТ спектральной кривой фрактальных размерностей $Dq–q$ от величины оптической плотности для определения информационного статуса функционального состояния органов. Для установления информационной карты различных функциональных состояний органов грудной клетки необходимо построить карту областей распределения множества точек ЦТ установленных информационных статусов, соответствующих различным функциональным состояниям органов легочной системы на плоскости XY, с помощью построения диаграмм Вороного. Диаграммы Вороного – это разбиение метрического пространства на области, в которых находятся объекты, таким образом, что каждому объекту соответствует область пространства, образованная точками, которые находятся ближе к этому объекту, чем к любому другому.

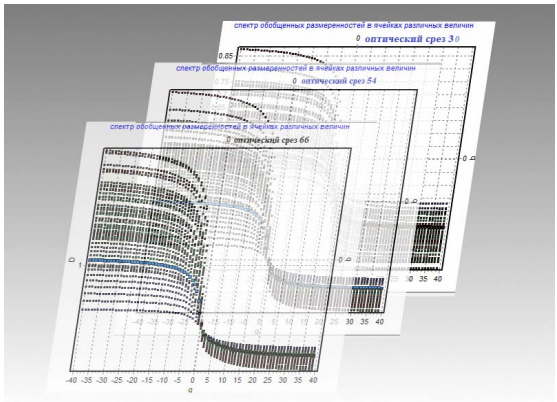


Рис. 2. Образование математического облака на основе результатов послойного фрактального анализа

Обсуждение результатов

Результаты расчета ЦТ для девяти рентгенограмм пациентов с диагнозом «без патологий» представлены в таблице. Индексами столбцов: n1…n9 приводится нумерация пациентов с заданным состоянием «без патологии».

Результаты расчета ЦТ оптических срезов рентгенограмм пациентов «без патологии»

	n1	*n2*	*n3*	*n4*	*n5*	*n6*	*n7*	*n8*	*n9*	сред. по норме	δ	%
X1	0.50	0.52	0.51	0.51	0.49	0.51	0.50	0.50	0.50	0.50	0.01	1.42
X2	0.50	0.53	0.52	0.51	0.50	0.52	0.51	0.51	0.50	0.51	0.01	1.70
X3	0.50	0.53	0.52	0.52	0.51	0.53	0.51	0.51	0.51	0.52	0.01	1.74
X4	0.51	0.54	0.53	0.52	0.51	0.53	0.52	0.51	0.52	0.52	0.01	1.80
X5	0.51	0.54	0.53	0.53	0.52	0.54	0.53	0.52	0.52	0.53	0.01	1.66
X6	0.52	0.54	0.54	0.53	0.53	0.55	0.53	0.53	0.53	0.53	0.01	1.55
X7	0.52	0.55	0.54	0.53	0.53	0.55	0.54	0.53	0.53	0.54	0.01	1.59
X8	0.53	0.55	0.55	0.53	0.54	0.55	0.54	0.53	0.54	0.54	0.01	1.46
X9	0.53	0.55	0.55	0.54	0.54	0.55	0.55	0.54	0.54	0.54	0.01	1.28
X10	0.54	0.55	0.55	0.54	0.55	0.55	0.55	0.54	0.54	0.55	0.01	1.16
Y 1	0.52	0.71	0.65	0.64	0.52	0.64	0.60	0.56	0.60	0.60	0.06	10.19
Y 2	1.09	1.49	1.37	1.33	1.12	1.38	1.26	1.19	1.23	1.27	0.12	9.58
Y 3	1.73	2.29	2.13	2.04	1.78	2.16	1.96	1.85	1.90	1.98	0.17	8.81
Y 4	2.39	3.12	2.92	2.78	2.50	2.98	2.73	2.57	2.61	2.73	0.23	8.32
Y 5	3.09	3.97	3.73	3.56	3.26	3.84	3.53	3.30	3.34	3.51	0.28	7.83
Y 6	3.83	4.84	4.56	4.36	4.06	4.71	4.37	4.07	4.13	4.33	0.31	7.26
Y 7	4.60	5.72	5.41	5.18	4.90	5.59	5.24	4.87	4.95	5.16	0.35	6.70
Y 8	5.40	6.61	6.29	6.01	5.77	6.49	6.13	5.70	5.77	6.02	0.38	6.23
Y 9	6.23	7.50	7.18	6.87	6.66	7.41	7.03	6.55	6.62	6.89	0.40	5.78
Y 10	7.08	8.41	8.08	7.75	7.56	8.33	7.94	7.40	7.50	7.78	0.42	5.38

Координаты ЦТ: по оси абсцисс X1–X10 и по оси ординат Y1–Y10, где индексы X и Y соответствуют номеру оптической области. Для каждого значения оптической плотности проводится расчет усредненной величины ЦТ – «средняя по норме», среднеквадратичное отклонение – «δ» и относительная погрешность. Наблюдается тенденция понижения величины относительной погрешности с ростом оптической плотности, при этом оценка ЦТ координат увеличивается: X на ~10 % и Y в ~13 раз.

На рис. 3 помещена диаграмма Вороного для оптического среза № 3.

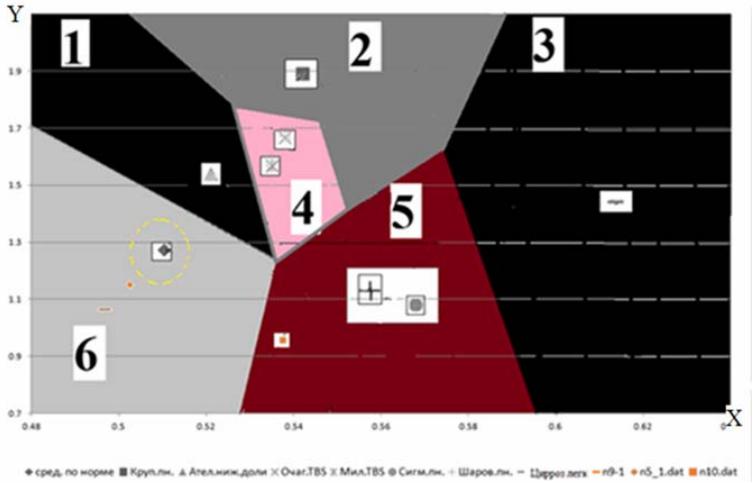


Рис. 3. Диаграмма Воронова центров тяжести математического облака фрактальных спектров ряда заболеваний и «без патологии» оптического среза № 3. Желтая штриховая линия вокруг ЦТ-состояния «без патологии» обозначает границы погрешности 10%: *1* – ателектаз легкого; *2* – крупозная пневмония; *3* – цирроз легкого; *4* – туберкулезы – очаговый (✳) и милиарный (✉); 5 – пневмонии (⊞ – шаровидная, ▣ – сегмовидная); 6 – «Без патологии». Желтой пунктирной линей обозначены границы погрешности определения состояния «без патологии»

Существует один ЦТ МО обследуемого, расположенный на границе 1-й и 5-й областей с заключением «без патологии», выходя за пределы области 6. Возможно, это связано с проявлениями изменений в легком при преморбидном состоянии и требует дополнительного обследования у узкого специалиста, например, пульмонолога.

Центр тяжести очагового и милиарного туберкулеза и № 4 расположены близко друг другу и отделены от других патологий, следова-

тельно, туберкулез в этих случаях имеет близкие изменения фрактального строения паренхимы легкого.

Патология легких «Ателектаз нижней доли» (▲ и № 1) расположен недалеко от значков туберкулез, следовательно, это может быть осложнение подобного процесса и требует дальнейшего обследования. Особо стоит точка *n*10, находящаяся на границе областей «Ателектаза легких» и «Шаровидной пневмонии». Такое расположение точки *n*10 показывает наличие изменений в паренхиме легкого, характерное для какого-либо заболевания, но программа не способна распознать это заболевание, врачи также не находят это заболевание на флюорограмме, следовательно, имеется преморбидное состояние какого-либо заболевания. При проведении анализа через некоторое время возможно будет определить динамику состояния пациента и уточнить прогноз на развитие здоровья, предупредив развитие заболеваний.

На рис. 4 величина обобщенного вектора центра тяжести в пространственных координатах *XYZ* некоторых состояний легких иллюстрирует обобщенную оценку математического облака фрактальных размерностей по всем оптическим срезам в целом, на которой четко разделяются указанные патологии от данных «без патологии». На рис. 4 значительно выделяются величины векторов «средняя по норме», находясь на первом месте по размерам, что позволит проводить предварительное отсеивание здоровых и больных на скрининг-осмотре.

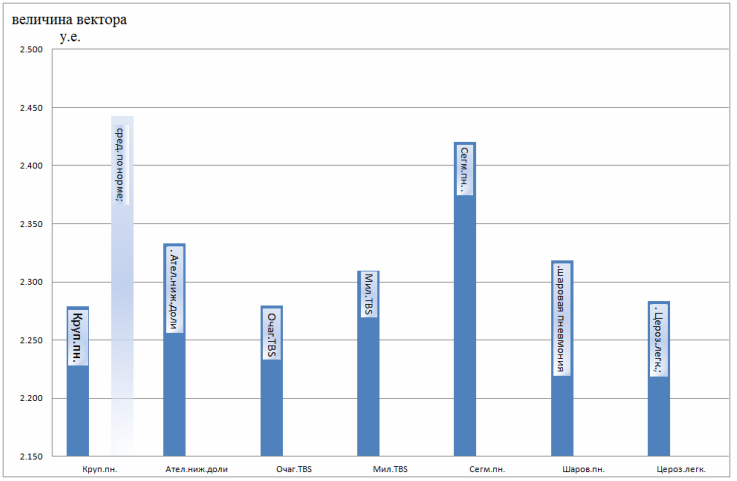


Рис. 4. Величина обобщенного вектора центра тяжести в пространственных координатах *XY* некоторых состояний легких

Обобщенная оценка ЦТ математического облака в виде диаграммы Воронова показана на рис. 5. При анализе указанной диаграммы обращает внимание близкое расположение областей и индексами «туберкулез» и «ателектаз» нижней доли легкого, что говорит о близком характере нарушения структуры легкого при этих видах патологии. Средняя величина, полученная при усреднении результатов фрактального анализа флюорограмм с заключением «патологии не обнаружено», находится обособлено.

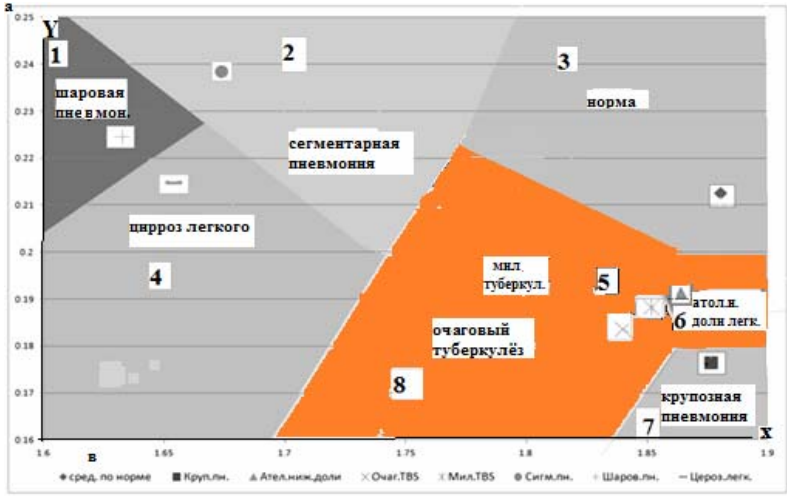


Рис. 5. Диаграмма Воронова – обобщенная оценка ЦТ математического облака в целом

Выводы

Разработан алгоритм расчета ЦТ спектра обобщенных размерностей рентгенограмм (флюорограмм) построения диагностической карты (диаграмм Воронова) функциональных состояний органов грудной клетки для диагностирования и прогнозирования динамики гомеостаза.

Погрешность вычисления ЦТ спектра фрактальных размерностей флюорограмм легкого при заключении врача «без патологии» не превышает 10 %.

Полученная числовая оценка величины отклонения обобщенного вектора ЦТ спектра обобщенных размерностей флюорограммы для различных состояний органов грудной клетки может быть использована для проведения скрининг-исследований.

Список литературы

1. *Баевский*, *Р. Н.* Концепция физиологической нормы и критерии здоровья // Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченнова. – 2003. – Т. 89, № 4. – С. 473–489.

2. *Годик*, *Э. Э.* Динамическое картирование физических полей биологических объектов / Э. Э. Годик, Ю. В. Гуляев // Вестник АН СССР. Сер. «Физика». – 1990. – № 1. – С. 78–87.

3. Информационные задачи функционального картирования биологических объектов / С. А. Платонов, Э. Э. Годик, А. М. Тараторин, А. Ю. Каргашин // Радиотехника. – 1991. – № 8. – С. 75–77.

4. Радиотепловое динамическое картирование биологических объектов / Ю. В. Гуляев, Э. Э. Годик, В. В. Дементиенко [и др.] // ДАН СССР. – 1988. – Т. 299, № 5. – С. 1259–1261.

5. Динамическое картирование магнитного поля сердца / Ю. В. Журавлёв, А. Я. Липович, А. Н. Матлашов [и др.] // ДАН СССР. – 1986. – Т. 286, № 2. – С. 451–454.

6. Динамическое картирование нейромагнитных полей / Э. Э. Годик, Ю. В. Гуляев, А. Н. Матлашов [и др.] // Тр. 6-й Междунар. конф. по биомагнетизму. – Токио, 1987. – С. 270–273.

7. *Trochim*, *W*. Concept mapping: an introduction to structured conceptualization in health care / W. Trochim, M. Kane // International Journal for Quality in Health Care. – 2005. – Vol. 17, № 3. – P. 187–191.

8. *Мандельброт*, *Б.* Фрактальная геометрия природы. – М. : Ин-т компьютерных исслед., 2002. – 656 с.

9. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогоев. – М. : Наука, 1994. – 383 с.

10. *Иванников*, *В. П.* Современные средства и возможности рентгенодиагностики (Проблемы нормализации рентгеновских снимков) / В. П. Иванников, В. А. Степанов, Е. В. Кочурова // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2007. – С. 144–157.

11. Фрактальный анализ рентгенограмм / В. П. Иванников, В. А. Степанов, В. В. Белых, В. Г. Суфиянов // Вестник ИжГТУ. – 2009. – № 3. – С. 150–154.

12. Информационно-диагностическая система распознавания заболеваний легких на основе мультифрактального анализа цифровых флюорограмм и деревьев решений / В. А. Степанов, Б. Н. Сопранов, А. Ф. Рыбочкин [и др.] // Информационно-измерительные диагностические и управляющие системы. Диагностика – 2013 : сб. материалов III Междунар. науч.-техн. конф. (14–15 мая 2013 г. Курск, ЮзГУ). – Курск : Изд-во Юго-Западный гос. ун-т, 2013. – С. 200–205.

13. Результаты диагностики заболеваний легких на основе деревьев решений и мультифрактального анализа цифровых флюорограмм / В. А. Степанов, А. И. Мурынов, В. Г. Суфиянов, А. Я. Мальчиков, Б. Н. Сопранов, В. В. Белых // Найновите постижения на европейската наука : материали за 8-а международ-

на научна практична конф. (17–25 юни 2012). – 2012. – Т. 15. Лекарство. – София : Бял ГРАД-БГ. – С. 88–95.

14. *Гусак, А. А.* Справочник по высшей математике. – Мн. : Тетра Системс. 2004. – 640 с.

The Method of Mapping the Results of Fractal Analysis of Fluorograms of Organs in Human Chest

The method of information evaluation by identifying of coordinates of the gravity center of the spectrum of fractal dimensions lungs radiographs in various pathologies is given in the article. Estimates of the status information 199 radiographs of lungs allow to make a diagnostic map of functional states on the basis of constriction Voronov chart. This article is intended for information specialists image processing technology.

Keywords: fractal; multifractal; fluorography; radiographs; diagnostics; Voronov's chart; screening gravity center; information spectrum

УДК 681.618.9/621.01

Е. В. Шалобаев, кандидат технических наук, профессор
E-mail: shalobaev47@mail.ru
Ф. А. Перепелица, директор Международного образовательного научного центра «Autodesk-ITMO»
E-mail: perepelitcafa@niuitmo.ru
Н. С. Красноруцкая, магистрант
E-mail: nadegda.sergeevna@mail.ru
ФГБОУ ВПО «СПбНИУ ИТМО» (Университет ИТМО)

Аддитивные технологии в машиностроении

Рассмотрены аддитивные технологии, используемые в машиностроении, такие как SLA, SLS, DMF, SLM, DLP, Poly-Jet, FDM, Ink-Jet. Перечислены преимущества аддитивных технологий в отраслях машиностроения по сравнению с существующими методами.

Ключевые слова: аддитивные технологии; *AF*-технологии; машиностроение; 3D-модель; *CAD*-система; *CAE*-система; *SLA*; *SLS*; *DMF*; *SLM*; *DLP*; *Poly-Jet*; *FDM*; *Ink-Jet*

Аддитивные технологии в настоящее время являются быстроразвивающимися и многообещающими. Данные технологии позволяют создавать изделия любой формы и практически из любого материала. Таким образом, они имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами. Аддитивные технологии нашли широкое применение во многих отраслях промышленности, в частности в машиностроении [1–5].

Аддитивные технологии (*AF*) – технологии, изготавливающие детали по данным трехмерной модели, методом постепенного наращивания материала, в отличие от классических методов, ориентированных на удаление материала из массива заготовки.

Сущность *AF*-технологий состоит в следующем:

Создание 3D-модели в *CAD*-системе → Выбор материала →
→ Анализ модели в *CAE*-системе → *AF*-машина → готовое изделие,

под *CAD*-моделью понимается описание изделия, его компьютерная модель; *AF*-машина – формирующее (в т. ч. печатающее) устройство.

© Шалобаев Е. В., Перепелица Ф. А., Красноруцкая Н. С., 2017

Использование современных *CAD*-систем для изготовления 3D-модели планируемого изделия позволяет на ранних этапах создания объекта обнаружить возможные дефекты и разобраться в их причинах. Современные *CAD*- и *CAE*-системы позволяют разрабатывать оптимальный алгоритм предварительного моделирования изделия, учитывая не только его конфигурацию, но и материал. В данном направлении развиваются работы, начатые еще в области т. н. «быстрого прототипирования» [6].

В условиях современного развития технологий предварительного моделирования и анализа планируемого изделия большое внимание уделяется выбору *CAD*- и *CAE*-систем. Например, для моделирования зубчатых передач считается наиболее эффективной комбинация *Autodesk Inventor* и *Autodesk Simulation Moldflow* [4].

При выборе *CAD*- и *CAE*-систем учитывается не только тип изделия и его материал, но и какие аддитивные технологии будут применены при его изготовлении.

В машиностроительных отраслях наиболее распространенными аддитивными технологиями являются *SLA*, *SLS*, *DMF*, *SLM*, *DLP*, *PolyJet*, *FDM*, *Ink-Jet*.

Наиболее точной технологией считается *SLA* – стереолитография. Жидкий фотополимер под действием лазерного луча меняет физические свойства, твердеет, образуя твердую поверхность в точке проекции луча.

Послойное лазерное спекание – *SLS* – является важным направлением *AF*-технологий. В данной технологии производится спекание с помощью лазеров за счет вычерчивания контуров, заложенных в *CAD*-модели. После сканирования рабочая платформа опускается в ванну с фотополимером и наносится свежий слой. При построении детали, имеющей нависающие элементы, строятся поддержки в виде тонких столбиков. После построения модель извлекается, остатки смолы смываются ацетоном или спиртом, поддержки удаляются.

Технология *DMF* – разновидность *SLS*-технологии, послойное лазерное спекание металлопорошковых композиций. В данной технологии порошковый материал подается в камеру в количестве для 1-го слоя, валик выравнивает материал, удаляет лишнее из камеры, лазерная головка спекает частицы нового порошка с предыдущим слоем. Процесс повторяется до окончания построения детали.

SLM – разновидность *SLS*-технологии, послойное лазерное плавление металлопорошковых композиций. В данной технологии лазерный луч расплавляет порошок в местах соприкосновения, металлические

частицы поочередно свариваются друг с другом, образуя материал высокой прочности.

Наиболее перспективной проекционной технологий является *DLP*-технология, суть которой заключается в засветке слоя фотополимера с помощью цифрового прожектора. Формируется так называемая «маска» каждого текущего сечения модели, проецируемая на рабочую платформу через особую систему микроскопических зеркал с помощью прожектора с высокой яркостью света. Формирование и засветка видимым светом каждого слоя происходит в течение 3–5 секунд. Авторы принимают участие в деятельности малого инновационного предприятия «Политех-инжиниринг» при СПбГПУ Петра Великого по реализации программы импортозамещения в этой наукоемкой и инновационной технологии в области программного обеспечения и обучения кадров [7]. Примером деятельности авторов является планетарный редуктор (рис. 1).

Рис. 1. Планетарный редуктор,
изготовленный в «Политех-инжиниринге»

Широкие возможности открываются для технологий струйной печати *Poly-Jet* и *Ink-Jet*, суть которых заключается в распылении фотополимера на платформу до затвердевания модели под действием ультрафиолетовой лампы.

Одним из способов аддитивного производства является метод послойного наплавления *FDM*. Данный метод предполагает создание трехмерных объектов за счет нанесения поочередных слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели.

Преимущества аддитивных технологий в отраслях машиностроения обеспечивают:

– изготовление уникальных деталей высокого качества,

– сокращение сроков проектирования изделия,

– увеличение рентабельности изготовления малой серии,

– автоматизация изготовления деталей,

– снижение веса деталей,

– создание комплексных, интегрированных деталей за один технологический цикл,

– отсутствие в деталях литейных дефектов,

– уменьшение отходов производства,

– управление физико-механическими свойствами создаваемого изделия.

Аддитивные технологии в машиностроении являются современными, инновационными и перспективными. Уже сейчас производят изделия, которые невозможно получить с помощью традиционных методов и обладающих вышеперечисленными достоинствами. Возможно, в будущем аддитивные технологии вытеснят традиционные методы во многих сферах жизни.

Список литературы

1. *Зленко*, *М. А.* Аддитивные технологии в машиностроении : пособие для инж. / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. – М. : ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.

2. *Зленко*, *М.* Аддитивные технологии в опытном литейном производстве. Технология литья металлов и пластмасс с использованием синтез моделей и синтез-форм / М. Зленко, П. Забеднов // Studfiles Россия. – URL: http://www.studfiles.ru/preview/6169158/ (дата обращения: 9.11.2016).

3. Аддитивные технологии // Государственный научный центр Российской Федерации ФГУП «НАМИ» Россия. – URL: http://nami.ru/directions/technical/technology-centre/rapid-prototyping-rapid-prototyping (дата обращения: 14.11.2016).

4. *Медунецкий*, *В. М.* Компьютерное моделирование и визуализация технологии изготовления нестандартных зубчатых колес из полимерных композиционных материалов / В. М. Медунецкий, Н. А. Романов // Приборостроение. – 2015. – № 5. – С. 397–400.

5. Обеспечение качественных показателей зубчатых колес, венцы которых выполнены из пластмасс и композитов / Е. В. Шалобаев, В. М. Медунецкий, Р. Р. Магдиев, В. Е. Старжинский, С. В. Шилько // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2012. – Вып. 12. Ч. 1. – С. 142–149.

6. *Старжинский*, *В. Е.* Проектирование пресс-форм для точных пластмассовых колес с использованием технологии быстрого прототипирования / В. Е. Старжинский, Е. В. Шалобаев // Прогрессивные технологии в машино-

и приборостроении. – Нижний Новгород ; Арзамас : НГТУ–АПИ, 2005. – С. 28–29.

7. Особенности использования программного обеспечения для проектирования зубчатых передач, изготавливаемых с помощью аддитивных технологий / Е. В. Шалобаев, Ф. А. Перепелица, В. А. Конаков, С. В. Шилько // Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения : материалы конф. с междунар. участием. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. – С. 31–39.

Additive Fabrication in Mechanical Engineering

The article deals with additive fabrication used in mechanical engineering, such as SLA, SLS, DMF, SLM, DLP, Poly-Jet, FDM, Ink-Jet. The advantages of additive fabrication in the fields of mechanical engineering in comparison with existing methods.

Keywords: Additive Fabrication; AF-technologies; engineering; 3D-model; CAD-system; CAE-system; SLA; SLS; DMF; SLM; DLP; Poly-Jet; FDM; Ink-Jet

УДК 621.383.93

Ю. К. Шелковников, главный научный сотрудник
E-mail: yushelk@mail.ru
Институт механики УрО РАН, г. Ижевск
А. А. Метелева, студентка
E-mail: meteleva-nami@rambler.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Повышение стабильности координатной характеристики информационно-измерительных систем с времяимпульсным режимом работы телевизионного сканистора

Рассмотрены вопросы повышения точности определения размеров и координат световых зон на телевизионном сканисторе. Показана необходимость применения для этой цели улучшения линейности и стабильности координатной характеристики. Описана сканисторная информационно-измерительная система с использованием емкостного времяимпульсного режима работы, обеспечивающего повышенную стабильность координатной характеристики.

Ключевые слова: информационно-измерительные системы; сканистор

Информационно-измерительные системы (СИИС) на основе телевизионных сканисторных *p-n-p*-структур (сплошного сканистора, дискретного мультискана) [1–5] обладают широкими функциональными возможностями, позволяя без механического контакта с объектом осуществлять измерения многих неэлектрических величин, характеризующих процессы производства и различные явления в физике, химии (размеры, координаты, перемещения, вращающие моменты, силы, давления, концентрации, плотности, расходы, температура и т. д.). При этом они не требуют дополнительных электромеханических узлов, отличаются достаточной чувствительностью, высоким координатным разрешением, малыми габаритами, высокой надежностью и длительным сроком службы, использованием простых электронных схем с низковольтным питанием и сравнительно низкой стоимостью [6–10].

Развертывающий времяимпульсный режим работы сканисторных структур (СС) позволяет получать информацию о пространственном распределении контролируемого изображения вдоль фоточувстви-

© Шелковников Ю. К., Метелева А. А., 2017

тельной поверхности сканистора и дает возможность создавать СИИС для использования в самых различных областях науки и техники [11–15]. Однако высокая чувствительность сканистора к перемещениям (порядка 1 мкм и выше) светового потока по фоточувствительной поверхности и одновременно его низкое телевизионное разрешение (~100 мкм) привели к использованию полупроводникового аналога телевизионной передающей трубки-сканистора в основном в качестве координатно-чувствительного фотоприемника для измерения размеров и координат разнообразных световых зон. Поэтому в СИИС параметром, переносящим информацию, служит длительность t_x импульса, пропорциональная расстоянию x световой зоны от конца сканистора. Структурная схема СИИС с развертывающим времяимпульсным режимом работы сканистора содержит блок БО опроса сканистора СК, включающим источник ИНС напряжения смещения делительной шины и генератор ГПН пилообразного напряжения опроса (рис. 1).

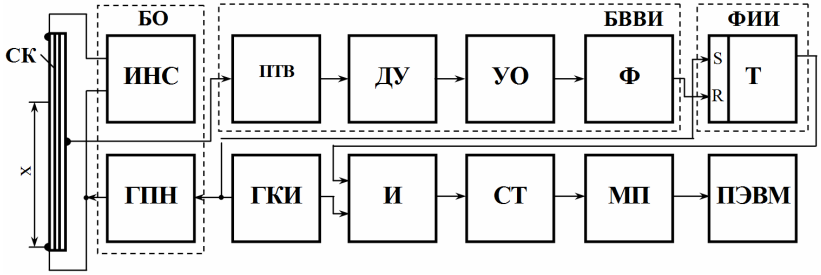


Рис. 1. СИИС с развертывающим времяимпульсным режимом работы сканистора

Для обеспечения высоких метрологических характеристик СИИС нагрузочное сопротивление $Z_н$, на котором выделяется фототок сканистора, должно иметь минимальную величину, что приводит к соответственно минимальному падению напряжения на нем от тока сканистора и обеспечивает равенство развертывающего напряжения и напряжения на коллекторе сканистора даже при значительных темновых и фоновых световых токах сканисторной структуры. С другой стороны, элементарную фотодиодную ячейку сканистора можно рассматривать как источник тока, для которого значительное уменьшение $Z_н$ может привести к снижению соотношения «сигнал/шум». Для

выделения информационного сигнала со сканистора почти идеально подходит преобразователь ПТВ ток-видеосигнал на основе быстродействующих аналоговых дифференциаторов, обеспечивающих экстремально низкое значение $Z_н$, т. к. точка суммирования таких ПТВ является виртуальным нулем схемы. На выходе ПТВ формируется видеосигнал (рис. 2, *в*), отражающий распределение светового потока вдоль сканистора. Блок БВВИ выделения видеоимпульсов производит выделение временного положения видеосигнала, соответствующего середине световой зоны на сканисторе, с помощью второго дифференцирующего устройства ДУ (рис. 2, *г*), усилителя-ограничителя УО (рис. 2, *д*) и формирователя Ф (рис. 2, *е*). Для регистрации местоположения широких световых зон на сканисторе в БВВИ обычно вводится третье дифференцирующее устройство. Следует отметить, что погрешность измерения координаты, вызванная нестабильностью светового потока, увеличивается при использовании для измерений более высоких производных видеосигнала. Таким образом, на выходе БВВИ формируется интервально-импульсный сигнал (рис. 2, *е*), где длительность t_x временного интервала от начала опроса до момента возникновения видеосигнала пропорциональна расстоянию X (рис. 2, *а*) световой зоны от начала сканистора. Формирователь ФИИ преобразует интервально-импульсный сигнал в широтно-импульсный (рис. 2, *ж*), поступающий на первый вход временного селектора (схемы И), на второй вход которого подаются счетные импульсы (рис. 2, *з*) от генератора ГКИ квантующих импульсов. Число N_x импульсов на выходе селектора (рис. 2, *и*), пропорциональное измеряемой координате x, зафиксированное счетчиком СТ, подается на микропроцессор МП, который применяется в качестве вычислительного или управляющего устройства и может использоваться как автономно, так и в качестве встраиваемого блока.

Идеальная координатная характеристика (КХ) сканистора соответствует линейному распределению координатно задающего напряжения вдоль него и линейному изменению напряжения развертки при постоянной скорости движения вдоль фоточувствительной поверхности эквипотенциальной линии опроса с нулевым потенциалом. Реальная КХ сканистора имеет нелинейность, определяемую технологической неоднородностью (0,5–3,0 %) распределения делительного слоя по его длине и смещением характерных точек видеосигнала из-за физических особенностей работы сканистора, при этом сплошная структура делительного слоя обусловливает его высокое разрешение по координате (до 0,01 %) [16].

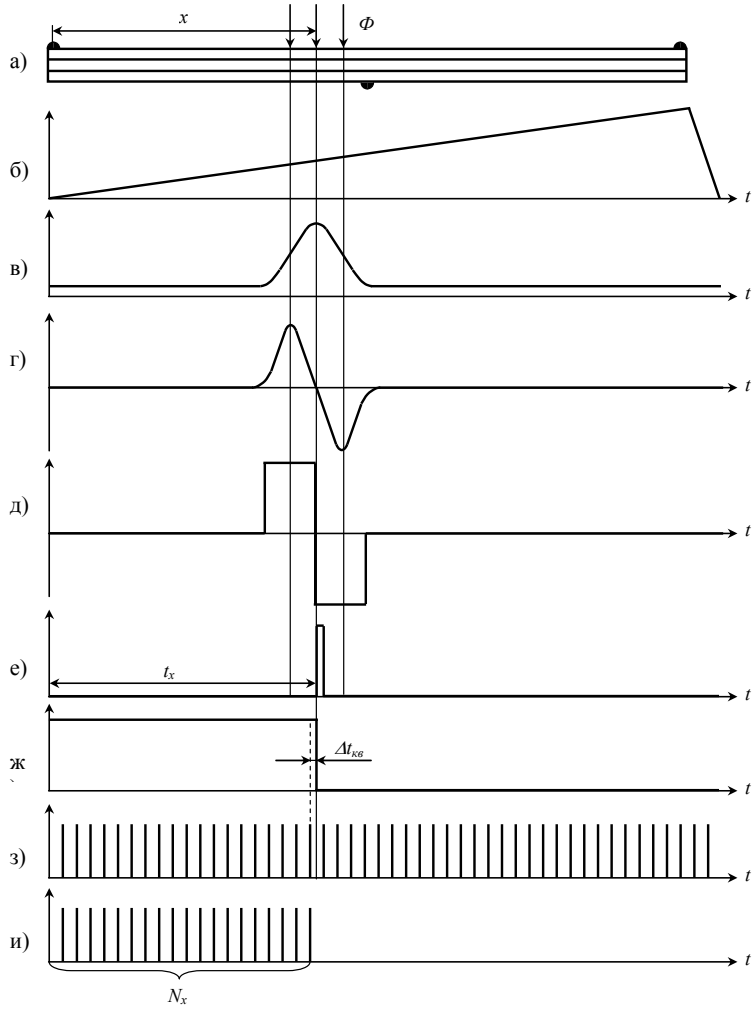


Рис. 2. Временные диаграммы, поясняющие работу СИИС с развертывающим времяимпульсным режимом работы сканистора

Следует отметить, что точность СИИС ограничивается как линейностью КХ, так и ее стабильностью. При изменении температуры окружающей среды или внутреннем разогреве сканистора выделяемой на его делительной шине мощностью выравнивающее действие теплоотвода металлической подложки коллектора приводит к нулевому гради-

енту температуры вдоль сканистора и, соответственно, к неизменному градиенту распределения напряжения вдоль собственно делительного слоя. Поэтому изменение температуры сканистора приводит к перераспределению координатно задающего напряжения ИНС между сопротивлениями собственно делительного слоя и его контактными сопротивлениями и, как следствие, температурному дрейфу КХ при сохранении ее формы. Стабильность КХ может быть улучшена применением следующих мер:

– стабилизацией температуры сканистора с помощью термостатов, охлаждаемых или нагреваемых до температуры выше температуры окружающей среды;

– использованием в цепи ИНС термокомпенсаторов, расположенных со сканистором на общем радиаторе.

Для повышения стабильности КХ можно также использовать емкостной времяимпульсный режим работы сканистора, отличающийся простотой схемной реализации и улучшенным тепловым режимом работы сканистора (рис. 3).

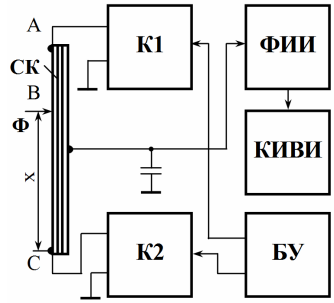


Рис. 3. СИИС с емкостным времяимпульсным режимом работы сканистора

Здесь на выводы А и С сканисторной структуры СК через ключи К1, К2 поочередно подаются импульсы опроса от блока БУ управления. При этом длительность t_x измерительного импульса на выходе компаратора ФИИ пропорциональна расстоянию x светового луча Ф от начала сканистора:

$$t_x = \left(R_{\partial}^{AB} + R_{\Phi} \right) \cdot C \cdot \ln U_0 \Big/ U_n , \qquad (1)$$

где R_{∂}^{AB}, R_{Φ} – соответственно, сопротивления делительного слоя на участке АВ и освещенных фотодиодных ячеек сканистора СК; C – зна-

чение емкости конденсатора; U_0 – амплитуда прямоугольных импульсов опроса; $U_п$ – пороговое значение напряжения, на которое срабатывает компаратор.

Блок компенсирующего измерителя временных интервалов КИВИ поочередно анализирует местоположение светового луча Ф на фоточувствительной поверхности сканистора относительно выводов А и С его делительного слоя и вырабатывает сигнал внутренней отрицательной обратной связи. В результате частота импульсов заполнения КИВИ изменяется и компенсирует изменение t_x от изменений R_{∂}^{AB} и R_{Φ}.

Следует отметить, что применение емкостного времяимпульсного режима работы сканистора позволяет упростить схемную реализацию СИИС, снизить величину нестабильности координатной характеристики и повысить точность измерений геометрических параметров контролируемого объекта.

Список литературы

1. *Липанов*, *А. М.* Использование телевизионного сканистора в технике двойного применения / А. М. Липанов, Ю. К. Шелковников // Известия РАРАН. – 2005 – № 2(43). – С. 71–75.

2. *Подласкин*, *Б. Г.* Позиционно-чувствительный фотодетектор-мультискан / Б. Г. Подласкин, Е. Г. Гук // Измерительная техника. – 2005. – Т. 8. – С. 31–34.

3. А. с. 974122 СССР. Устройство для измерения линейного перемещения светового луча / Ю. К. Шелковников, Ю. И. Евсеев (СССР). – 1982.

4. Пат. 2348900 Российская Федерация. Устройство для измерения размеров объектов / Липанов А. М., Шелковников Ю. К., Осипов Н. И., Кизнерцев С. Р. – Опубл. 19.11.2007.

5. *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.

6. *Шелковников*, *Ю. К.* Сканисторная информационно-измерительная система с адаптивным режимом сканирования // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2. – С. 169–172.

7. *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.

8. *Шелковников*, *Ю. К.* Выделение видеосигнала с мультискана модуляцией развертывающего напряжения // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 107–112.

9. *Липанов*, *А. М.* Технология изготовления эпитаксиальных сканисторных датчиков / А. М. Липанов, Ю. К. Шелковников // Известия РАРАН. – 2005. – № 2(43). – С. 75–79.

10. *Липанов*, *А. М*. Теоретические основы и технология изготовления телевизионных сканисторных структур / А. М. Липанов, Ю. К. Шелковников. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 133 с.

11. *Шелковников*, *Ю. К.* Прецизионная информационно-измерительная система на основе телевизионного сканистора // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 1. – С. 244–249.

12. Влияние физических особенностей телевизионной сканисторной структуры на точность измерения непрямолинейности ствольных труб / А. М. Липанов, Ю. К. Шелковников, А. В. Алиев, К. В. Сермягин // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 2. – С. 112–117.

13. 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.

14. *Шелковников*, *Ю. К*. Информационно-измерительная система на основе телевизионного сканистора с увеличенной длиной фоточувствительной поверхности / Ю. К. Шелковников, Н. И. Осипов, С. Р. Кизнерцев // Проблемы механики и материаловедения : сб. тр. ИМ УрО РАН. – 2014. – С. 231–236.

15. Пат. 2151361 Российская Федерация. Датчик координат стрелкового тренажера / Шелковников Ю. К., Веркиенко А. Ю., Осипов Н. И., Подласкин Б. Г. – Опубл. 02.08.1999.

16. *Шелковников*, *Ю. К*. Повышение стабильности и линейности координатной характеристики сканисторных информационно-измерительных систем // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 251–255.

УДК 620.179.16

А. В. Якимов, студент
E-mail: yakimov.aleksander@yandex.ru
Л. В. Волкова, кандидат технических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

Исследование остаточных напряжений по сечению рельсов акустическим методом

Сравниваются остаточные напряжения в рельсах в зависимости от наработки. Для оценки напряжений используется метод на основе явления акустоупругости. Представлены результаты контроля остаточных напряжений в рельсах разных годов изготовления и разных наработок.

Ключевые слова: акустоупругость; электромагнитно-акустический преобразователь; остаточное напряжение; рельс

Введение

Рельсы являются верхним элементом железнодорожного пути, которые воспринимают воздействие подвижного состава. Работоспособность железнодорожного транспорта определяется качеством изготовления рельсов. При прохождении состава рельсы испытывают периодические вертикальные и горизонтальные нагрузки при ускорении и замедлении поезда. На изогнутых участках пути происходит проскальзывание колес, поэтому головка рельсов истирается в вертикальном направлении [1].

Задача продления срока работы деталей и конструкций приводит к появлению новых методик выявления напряжений, возникающих при изготовлении и эксплуатации элементов. 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. Ранее проведены исследования по созданию оборудования и методик измерений внутренних напряжений, вагонных и локомотивных колес [2–6].

В последнее время применение поперечных волн вызывает очень большой интерес для неразрушающего контроля рельсов из-за сложной геометрической формы рельса. Особенно большой интерес вызы-

© Якимов А. В., Волкова Л. В., 2017

вает применение волн, когда возбуждается сигнал и принимается бесконтактно электромагнитно-акустическим преобразователем.

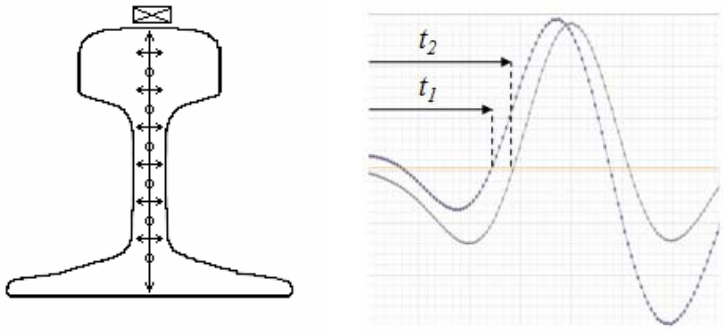
Целью работы является исследование закономерностей распространения поперечных волн в отдельных сечениях, генерируемых ЭМА-преобразователем, для дальнейшего использования при оценке распределения остаточных напряжений в рельсах.

Методика измерений

В основу технологии измерений напряжений в рельсах была положена известная методика контроля напряженно-деформированного состояния в железнодорожных колесах [1].

В основе метода лежит зависимость скорости распространения ультразвуковых волн от механических напряжений в твердом теле, связанных через акустоупругие коэффициенты [7]. 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 [8–13].

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*)

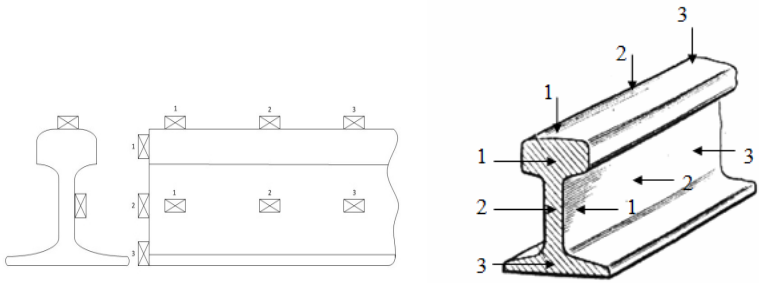
Разница во времени прохождения импульсов, поляризованных вдоль и перпендикулярно оси рельса, пропорциональна значению остаточных напряжений. Значения времени распространения поперечных волн t_1 и t_2 по одному участку рельса используются для вычисления остаточных напряжений σ по формуле [8–10]:

$$\sigma = D\left(\frac{t_1}{t_2} - 1\right), \quad (1)$$

где D – коэффициент упруго-акустической связи для исследуемого материала, определенный экспериментально и равный 131 ГПа.

Результаты исследований

Для проведения исследований были выбраны образцы рельс Р65 и Р65К. Измерения проводились с использованием ЭМАП, излучающим нормально вводимые поперечные волны, поляризованные в двух направлениях. С помощью установки СЭМА, используемой для контроля напряженно-деформированного состояния, осуществлялось возбуждение и прием ультразвуковых волн. Преобразователь устанавливался на головку, на шейку и торец. Схема измерений представлена на рис. 2.



а *б*

Рис. 2. Схема установки ЭМА-преобразователя (*а*), вид отрезка рельса (*б*): *1*, *2*, *3* – места установки преобразователя

Измерения проводились на четырех рельсах, один из которых под № 1 (2013 г. в.) новый, остальные – эксплуатировавшиеся (№ 840 (1984 г. в.) с наработкой 840 млн т брутто, № 990 (1985 г. в.) с наработкой 990 млн т брутто, № 400 (1996 г. в.) с наработкой 400 млн т брутто).

Геометрические параметры по ГОСТ 8161–75 приведены в табл. 1. Допускается отклонение по высоте рельса $180^{+2,0}_{-1,5}$, по ширине головки $75^{+1,0}_{-1,5}$.

Таблица 1. **Геометрические параметры рельс**

№ рельса	Высота, мм	Ширина головки, мм	Ширина шейки, мм	Длина, мм
1	179,58	72,38	17,7	250
400	178,74	60,48	17,9	300
840	175,8	72,75	17,7	261
990	171	68,19	18,2	235

Остаточные напряжения в отрезке рельса определялись в трех местах на головке, на шейке и торцах (рис. 2, *б*). В каждой точке производилось по 5 измерений для нахождения среднего значения времени.

Общие графики остаточных напряжений представлены на рис. 3.

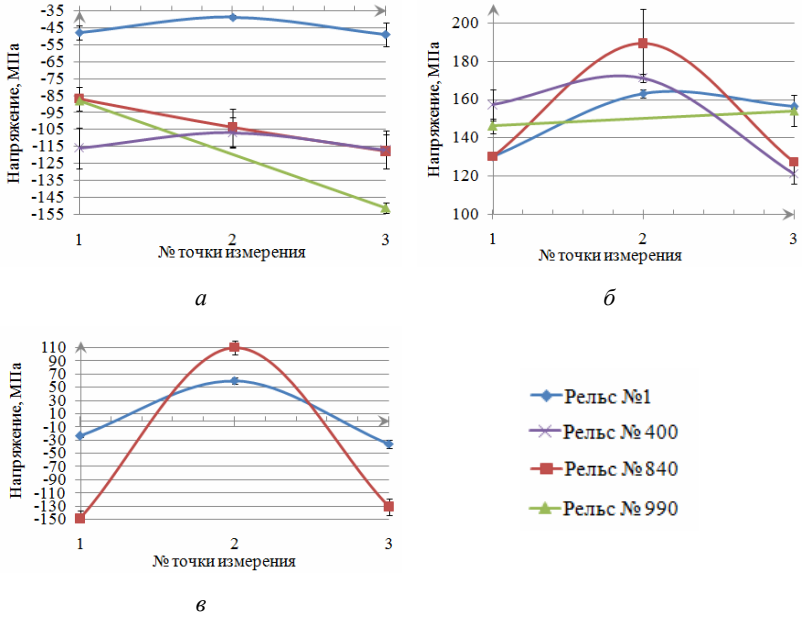


Рис. 3. Графики остаточных напряжений при измерениях: на головке (*а*); шейке (*б*); торцах (*в*)

Если сравнивать значения остаточных напряжений (рис. 3, *а*), видно, что в крайних точках *1* и *3* остаточные напряжения выше, чем посередине. Этому могло способствовать механические воздействия при резке. Также можно заметить, что рельсы № 840 и 400 имеют в точке *2* схожее остаточное напряжение, по этим данным можно судить, что рельс эксплуатировался. Высокие остаточные напряжение в исследуемом образце под № 990 в точке *3*, на этом образце присутствует трещина.

Были измерены твердости рельс (рис. 4). Из (рис. 4, *а*) видно, что наилучшей твердостью поверхности катания обладает рельс под № 840, 990 и 400. На графике (рис. 4, *б*) указаны величины твердости на шейке, что соответствует нормам ГОСТ и не должно превышать 41,4 HRC (по Роквелу).

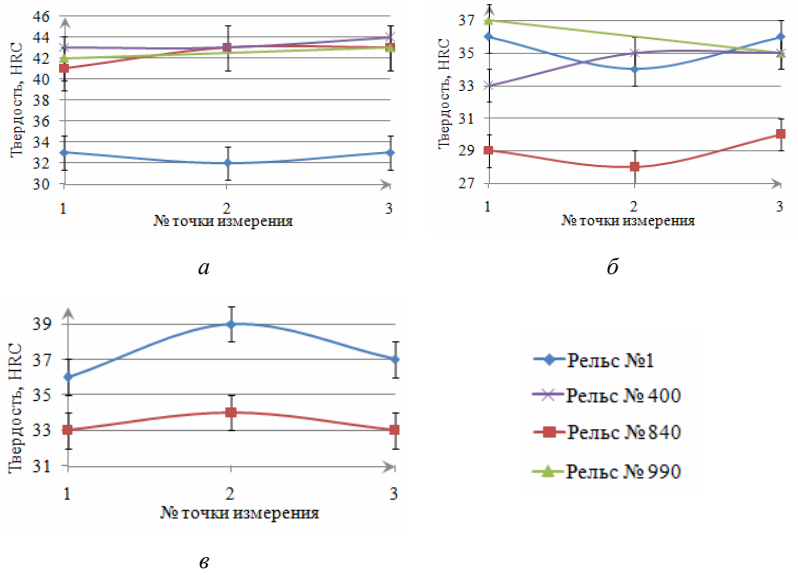


Рис. 4. Графики твердости при измерениях: на головке (*а*); шейке (*б*); на торцах (*в*)

Выводы

Опробованная технология контроля напряжений растяжения-сжатия в рельсах позволяет проводить измерения в любом сечении рельса, что дает высокую точность результатов.

По разнице прихода двух волн были рассчитаны остаточные напряжения. По полученным данным можно судить о том, что в новом

рельсе напряжения после поставки все же остаются, но если сравнивать с данными эксплуатировавшихся рельсов, то эти значения очень малы.

Для выявления структуры были измерены твердость рельсов. У эксплуатировавшихся твердость на поверхности катания намного выше по сравнению с новыми.

Список литературы

1. *Ильин*, *С. И.* Технология термической обработки сталей : учеб. пособие / С. И. Ильин, Ю. Д. Корягин. – Челябинск : Издат. центр ЮУрГУ, 2009. – 120 с.

2. Приборы для измерений скорости акустических волн в металлах и сплавах / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Л. В. Волкова, Е. Н Балобанов // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – № 3. – С. 142–146.

3. *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.

4. *Муравьев*, *В. В*. Ультразвуковой контроль остаточных напряжений в бандажах локомотивных колес при производстве / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, М. А. Лапченко // Дефектоскопия. – 2016. – № 5. – С. 3–16.

5. *Муравьев*, *В. В*. Экспериментальная оценка остаточных напряжений и натяга бандажей локомотивных колес методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова // Проблемы машиносторения и надежности машин. – 2016. – № 4. – С. 98–104.

6. Электромагнитно-акустический метод исследования непряженно-деформированного состояния рельсов / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, В. А. Куликов // Дефектоскопия. – 2016. – № 7. – С. 12–20.

7. *Полухин*, *П. И.* Прокатка и термическая обработка железнодорожных рельсов / П. И. Полухин, Ю. В. Грдина, Е. Я. Зарвин. – М. : Металлургия, 1962. – 431 с.

8. Акустическая тензометрия и структуроскопия железнодорожных колес / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Л. В. Волкова, Е. Н Балобанов : моногр. / отв. ред. В. В. Муравьев. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2014. – 180 с.

9. *Муравьев*, *В. В*. Оценка величин натяга бандажей локомотивных колес методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова // Дефектоскопия. – 2013. – № 9. – С. 40–46.

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

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

12. *Муравьев, В. В.* Оценка усталостных трещин в боковых рамах тележек грузовых вагонов акустико-эмиссионным методом / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 9. – С. 24–29.

13. 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.

Study of Residual Stresses in Cross-Section of Rails Using Acoustic Method

The article compares the residual stresses in the rail according to the operation. To assess stress method is used based on the phenomenon acoustoelasticity. The results of monitoring of residual stresses in the rails of different years of manufacture and different developments.

Keywords: acoustoelasticity; electromagnetic acoustic transducer; residual stress; rail

Секция 3. **Приборы в системах управления и контроля**

УДК 621.317.78

Е. Я. Ардашев, студент
E-mail: vaserman94@mail.ru
А. А. Штин, кандидат технических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Разработка лабораторного стенда для исследования цифровых ваттметров *ROBITON* PM1 и PM2

Представлена разработка лабораторного стенда для исследования студентами цифровых ваттметров ROBITON PM1 и PM2 на практических занятиях по дисциплине «Метрология. Электрические измерения».

Ключевые слова: разработка лабораторного стенда; цифровые ваттметры

Активная мощность и энергия являются важнейшими параметрами в цепях переменного тока. Долгое время для измерения активной мощности в цепях переменного тока часто использовались ферродинамические ваттметры. Для измерения энергии использовались счетчики индукционной системы. В этих счетчиках была жесткая связь между их показаниями и энергией. Всех устраивал единый тариф.

Однако сейчас, после перехода страны на рыночные отношения, население больше обеспокоено экономией электроэнергии. Поскольку в разное время суток потребление тоже разное, была введена тарификация. Индукционный счетчик не рассчитан на несколько тарифов и требует периодического обслуживания. В связи с этим повсеместно стали использовать цифровые измерительные приборы. Они обладают высокой точностью, учитывают несколько тарифов, потребляют гораздо меньше электроэнергии и даже могут передавать данные на расстояние.

Широкое распространение цифровых ваттметров и счетчиков обусловило необходимость их изучения в соответствующих дисциплинах энергетических специальностей [1–5].

© Ардашев Е. Я., Штин А. А., 2017

Цель:
Изучение студентами цифровых ваттметров.

Задачи:
1. Разработка лабораторного стенда для изучения цифровых ваттметров *ROBITON* PM-1 и PM-2.

2. Разработка методических указаний к выполнению лабораторной работы «Исследование цифровых ваттметров *ROBITON* PM-1 и PM-2», по дисциплине «Метрология. Электрические измерения».

Основным узлом цифрового ваттметра (рис. 1) является микроконтроллер, он содержит элементы автоматического управления режимами работы и дистанционного управления пределами измерения, индикацией измеряемой величины, он автоматически устанавливает 0 и самоблокируется. Также микроконтроллер, при включении в состав информационно-измерительной системы, имеет возможность вывода информации на канал общего пользования.

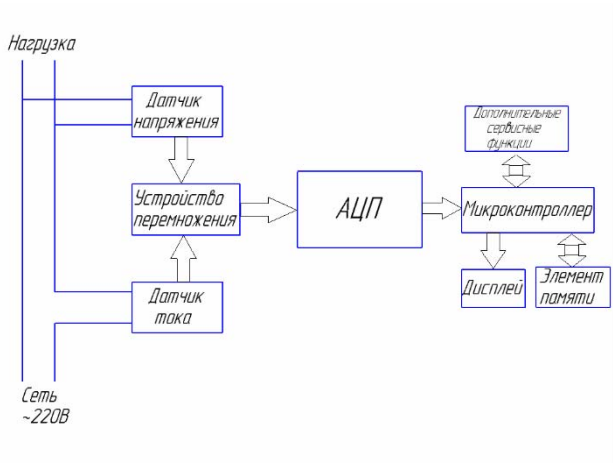


Рис. 1. Блок-схема цифрового ваттметра

В качестве датчика напряжения чаще служит делитель напряжения (два резистора). В качестве датчика тока – измерительный шунт, хотя долгое время цифровые ваттметры должны были иметь измерительный трансформатор тока.

Сигналы с датчиков поступают на устройство перемножения. В данном случае это аналоговый перемножитель с усреднителем. В цифровых ваттметрах также используют схему с цифровым пере-

множителем, перед которым стоят отдельные аналого-цифровые преобразователи (АЦП) с каждого из датчиков.

Бытовые электронные ваттметры *ROBITON* PM-1 и PM-2 (далее PM-1 и PM-2) представляют собой переходники со штепсельной вилкой C2b согласно ГОСТ 7396.1–89 90 (рис. 2); PM-1 имеет вертикальный ЖК-дисплей; PM-2 – горизонтальный. Размер PM-1: 125×63×35 мм. Размер PM-2: 125×65×33 мм.

Рис. 2. Цифровой ваттметр со штепсельной вилкой C2b

Разработка лабораторного стенда

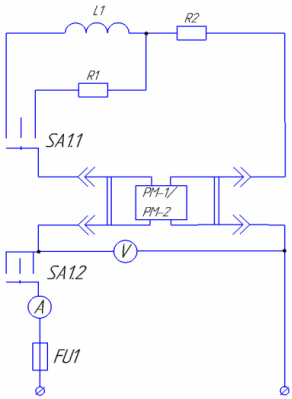


Рис. 3. Принципиальная схема лабораторного стенда

Основное назначение лабораторного стенда – сравнение студентами показаний аналоговых приборов и цифровых приборов (рис. 3).

Стенд предусматривает подключение разного рода нагрузки, находящейся внутри его корпуса. При выполнении лабораторной работы можно подключать внешнюю нагрузку по усмотрению преподавателя.

Измерительные приборы

Стенд включает в себя аналоговый вольтметр с пределом измерения 300 В и амперметр с пределом измерения 1А. Лицевая панель лабораторного стенда изображена на рис. 4.

Проводники

Для соединения элементов цепи использовался многожильный провод марки ПВ-2 сечением 2,5 мм^2. Вывод в сеть осуществлялся проводом ПР-2х1,5, длиной 1метр.

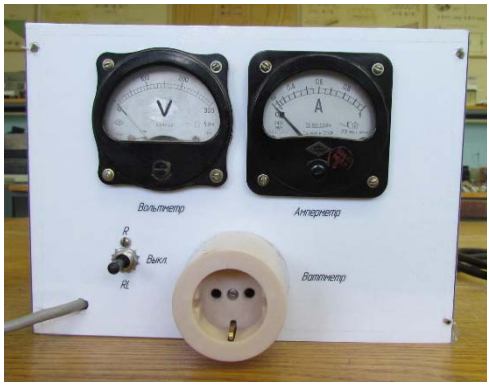


Рис. 4. Лицевая панель лабораторного стенда

Корпус

Металлический (сталь и алюминий) ящик с перфорационными отверстиями для вентиляции и ручкой для транспортировки.

Размеры: 28×20×22 см.

Выводы

1. Изучены принципы работы электромеханических и цифровых ваттметров.

2. Собран, проверен и отрегулирован лабораторный стенд для изучения цифровых ваттметров *ROBITON* PM-1 и PM-2.

3. Разработаны методические указания для выполнения студентами лабораторной работы «Исследование цифровых ваттметров *ROBITON* PM-1 и PM-2».

4. Результаты работы могут быть использованы при разработке более сложного лабораторного стенда и проведении исследований в области метрологии.

Список литературы

1. Электродинамические и ферродинамические приборы // Электротехника: в доступной форме. – URL: http://electrono.ru/elektroizmeritelnye-pribory-i-metody-izmerenij/98-elektrodinamicheskie-i-ferrodinamicheskie-pribory (дата обращения: 10.11.16).

2. *Алукер*, *Ш. М.* Электроизмерительные приборы. – 2-е изд. – М. : Высш. школа, 1966. – 280 с.

3. *Сигаев*, *А.* Семейство микросхем для контроля расхода электроэнергии, фирмы Cirrus Logic // compitech. – URL: http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/01_02/stat_22.htm (дата обращения: 10.11.16).

4. *Голуб*, *В.* Электронные счетчики электроэнергии // chipinfo. – URL: http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200206/9.html (дата обращения: 10.11.16).

5. *Белоусов*, *Ю. М.* Поверка и калибровка амперметров, вольтметров, ваттметров и варметров. Учебное пособие / Ю. М. Белоусов, Л. А. Романова, А. Р. Усеинов. – М. : Изд-во «Академия стандартизации, метрологии и сертификации», 2004. – 66 с.

Development of the Laboratory Stand for the Study of Digital Power Meter ROBITON PM1 and PM2

This paper presents the development of the laboratory stand for the study of digital power meter ROBITON PM1 and PM2 at a practical training on discipline Metrology.

Keywords: development of laboratory stand; digital power meters

УДК 004.312

А. Л. Джауль, студент
E-mail: Foulter@yandex.ru
В. А. Стародубцева, кандидат технических наук, доцент
E-mail: Starodubceva_v_a@istu.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Анализ совместимости микроконтроллера *LOGO!* с электроприводом пассажирского лифта

Рассматривается проблема совместимости микроконтроллера LOGO! Siemens и управляемого им электропривода. Выделяются основные проблемы программирования и эксплуатации логического модуля LOGO! для системы управления пассажирским лифтом.

Ключевые слова: микроконтроллер; программируемый логический контроллер; *LOGO!*; электропривод; совместимость

Использование микроконтроллеров получило широкое распространение благодаря автоматизации многих производственных процессов. Улучшение качества продукции, отстранение человека от производств, опасных для здоровья, повышение производительности труда, оптимизация и упрощение процесса управления – главные достоинства автоматизации. Однако многофункциональные сложные алгоритмы могут представлять проблему, которую сможет решить не каждый микроконтроллер.

Так, уже при создании схемы управления пассажирским лифтом возникает множество сложностей. Попытка связать несколько функций в одну систему с разнообразными сценариями при помощи ступенчатой схемы (диаграммы контактов или принципиальной схемы) или функциональной блок-схемы (функциональной диаграммы) резко усложняет ее состав. Данная проблема касается не только процесса создания, но и эксплуатации, т. к. это усложняет прочтение схемы, а также ее оптимизацию и отладку.

В свою очередь, разветвленная схема управления требует значительного объема памяти. На кафедре «Электротехника» на лабораторном стенде по изучению систем автоматизации, решаемых с помощью микрокотроллера *LOGO!* была реализована схема управления четырехэтажным грузовым лифтом с системами отслеживания этажа и ава-

© Джауль А. Л., Стародубцева В. А., 2017

рийной остановки кабины, что потребовало 75 % всей имеющейся памяти. Решением могло бы являться приобретение карт памяти, однако при переходе к созданию схемы управления пассажирским лифтом будут появляться все новые негативные моменты. Существует ограничение на расширение системы. Так, общее количество дискретных входов системы (модуля программируемого логического контроллера и модулей расширения) не может превышать 24, а число дискретных выходов не может превышать 16 [1]. Дальнейшее расширение возможно при использовании центрального модуля типа *LOGO!* 0BA7, имеющего в своем составе порт *Ethernet*, что позволяет расширить систему за счет сетевого обмена с другими системами со своими модулями расширения. Но и в этом случае система будет иметь ограничения. Максимальное число входных (выходных) дискретных сигналов в системе не может превышать 64, аналоговых входов – 32, аналоговых выходов – 16. При этом важно понимать, что программу выполняет только ведущий логический модуль. Ведомые модули собственной программы не имеют и выполняют функции блоков расширения [2]. Отсюда, ограниченное число выходов и входов, а также линий связи. Также подобный способ расширения занимает довольно значительный объем пространства. На рисунке показана конфигурация расширения системы *LOGO!*

Все это показывает нам, что придется приобрести дополнительное оборудование для создания подобных схем управления. Цены на разные модули *LOGO!* и дополнительное оборудование на 2016 г. приведены в таблице.

Поскольку контролер воспринимает входные аналоговые сигналы только стандартного типа, 0-20мА-датчики должны иметь нормализованные выходные сигналы. Стоимость таких датчиков сравнима с самим контроллером. Так, для реализации схемы управления пассажирским лифтом придется потратить около 30 000 руб., и это без учета стоимости датчиков, установки и эксплуатации самого *LOGO!*.

Конечно, *LOGO!* предоставляет широкие возможности [3]:

1) Интуитивно понятный и простой графический интерфейс.

2) Имитация работы коммутационной программы на ПК.

3) Удобная настройка блоков.

4) Запуск и остановка выполнения коммутационных программ с персонального компьютера.

5) Тестирование в оперативном режиме: отображение изменений состояния и текущих значений модуля *LOGO!* в режиме *RUN*:

– состояния цифровых входов и выходов, битов регистра сдвига;

– значения всех аналоговых входов, выходов и флагов;

– результаты работы всех блоков;
– текущие значения (включая значения времени) блоков.

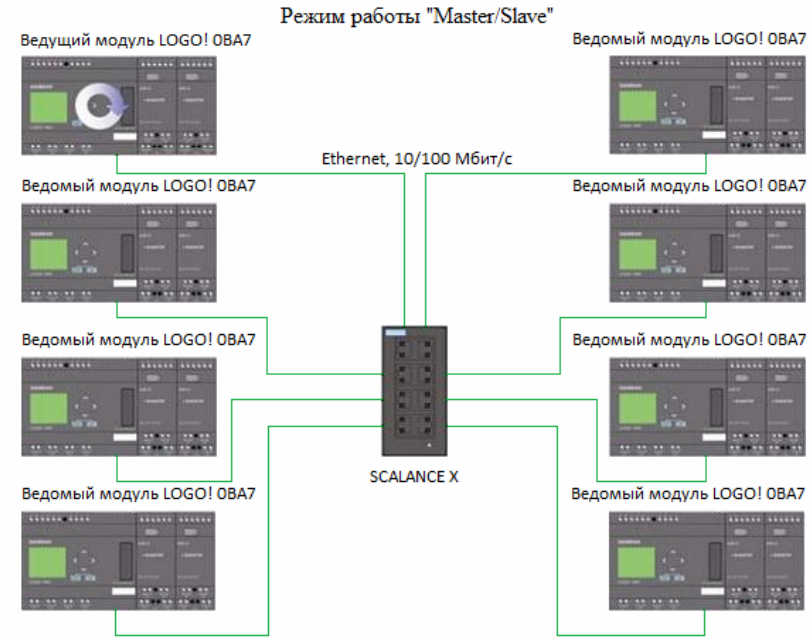


Рис. 1. Конфигурация расширения *LOGO!*

Таблица 1. **Цена продукции *LOGO! Siemens* на 2016 г.**

Наименование продукта	Цена, евро
Логический модуль с дисплеем Siemens LOGO! 12/24RC	138
Логический модуль без дисплея Siemens LOGO! 12/24RCo	110
Логический модуль с дисплеем Siemens LOGO! 230RC	142
Модуль ввода-вывода дискретных сигналов LOGO! DM8 12/24R	76
Модуль ввода аналоговых сигналов LOGO! AM2 PT100	110
Соединительный кабель Siemens LOGO! - PC (COM)	90
Программное обеспечение LOGO! Soft Comfort V6.0	23

Однако данный микроконтроллер подходит для реализации лишь бытовых и производственных задач, таких как лестничное или внешнее освещение, солнцезащитные жалюзи, шторы, освещение витрин магазинов, а также для управления системами кондиционирования воздуха, управления воротами или насосами систем водоснабжения. Огромные затраты, ограничение числа входов и выходов, малый объем памяти устройства и неуниверсальный способ построения коммутационной схемы делает задачу автоматизации электропривода пассажирского лифта затруднительной для программируемого реле *LOGO!*, а при расчете на большее количество этажей автоматизация и вовсе не представляется возможной.

Необходимо провести анализ выпускаемых микроконтроллеров для выбора оптимального варианта решения поставленной задачи.

Список литературы

1. *Иванин*, *О.* Siemens Simatic и Logo. Ищем альтернативы. – URL: http://ua.automation.com/content/siemens-simatic-logo-vozmozhnye-alternativy-chast-i (дата обращения: 10.11.2016).

2. Siemens. Руководство LOGO!. Справочник по аппарату. 2009. – URL: http://www.promspecrele.ru/documents/LOGO!_ Manual_Russian.pdf (дата обращения: 10.11.2016).

3. Siemens. Руководство по программированию в среде LOGO! Soft Comfort V6.0. – URL: http://www.promspecrele.ru/documents/LOGO!SoftComfort_ v6.0_rus.pdf (дата обращения: 10.11.2016).

Compatibility Analysis of the Microcontroller LOGO! with Passenger Electric Elevator

Compatibility problem of microcontroller LOGO! Siemens with passenger elevator electric drive is considered in this paper. Basic programming and exploitation of LOGO! logic module problems are considered for passenger elevate drive system.

Keywords: microcontroller; Programmable Logic Controller; LOGO!; electric drive; compatibility

УДК 621.313.3

К. В. Кожевников, магистрант
E-mail: konstantinkoj@gmail.com
И. В. Штенников, кандидат технических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Разработка источника питания асинхронного двигателя вентилятора

Разработана схема источника питания асинхронного двигателя вентилятора, проведено ее моделирование в среде NI Multisim. Получены требуемые параметры выходного напряжения.

Ключевые слова: источник питания; электродвигатель; вентилятор; автоматическое управление

Существуют вентиляционные системы подачи очищенного воздуха через систему фильтров с заданным давлением на выходе. По мере эксплуатации таких систем со временем происходит засорение фильтрующего элемента и, как следствие, снижение давления воздуха на выходе системы.

Для поддержания заданного давления воздуха применяют регулирование частоты вращения вентилятора с помощью различных устройств [1]:

– механических вариаторов,
– гидравлических муфт,
– дополнительно вводимыми в статор или ротор резисторами,
– электромеханических преобразователей частоты,
– статических преобразователей частоты.

Применение первых четырех устройств неэффективно. Они не обеспечивают высокого качества регулирования скорости вращения, не экономичны, влекут большие затраты на производство и дальнейшее обслуживание системы.

Наиболее совершенными устройствами управления асинхронным приводом являются статические преобразователи частоты [2], в которых регулирование скорости вращения осуществляется методом частотного регулирования. Принцип данного метода заключается в изменении частоты питающего напряжения асинхронного двигателя:

© Кожевников К. В., Штенников И. В., 2017

$$w = \frac{2\pi f}{p},$$

где w – скорость вращения магнитного поля статора асинхронного двигателя; f – частота питающего напряжения; p – количество пар полюсов.

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 [3].

Разрабатываемый источник питания асинхронного двигателя вентилятора должен соответствовать следующим характеристикам:

– выходной ток – 4 А,

– выходное напряжение – переменное трехфазное 220 В,

– частота выходного напряжения – 400 ±40 Гц,

– параметры питающей электросети – постоянного напряжения 27 В.

Двигатель, питающийся переменным напряжением частотой 400 Гц, имеет значительно меньшие массу и габариты, чем двигатели постоянного тока или асинхронные двигатели промышленной частоты аналогичной мощности.

Структурная схема управления работой вентилятора, включающая: источник постоянного напряжения, источник питания асинхронного двигателя (АД), входной фильтр, вентилятор, система контроля давления воздуха приведена на рис. 1.

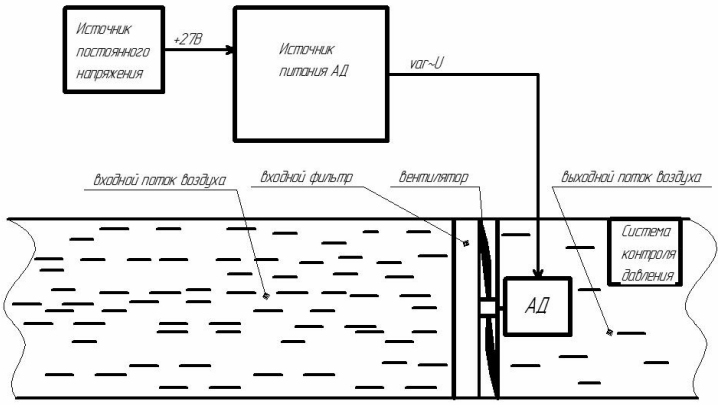


Рис. 1. Структурная схема управления работой вентилятора

Постоянное напряжение сети 27 В преобразуется источником питания асинхронного двигателя вентилятора в переменное трехфазное напряжение 220 В частотой 400 Гц.

Принципиальная электрическая схема источника питания АД приведена на рис. 2. В ее состав входят: параметрический стабилизатор на стабилитроне VD, генератор прямоугольных импульсов на микросхемах DD1.1 и DD1.2 с частотозадающей RC цепью, формирователь управляющих импульсов на микросхеме DD2, блоки формирования импульсов DD3, DD4, VT1-VT6, силовые ключи на транзисторах VT7-VT12, трансформаторов TV1-TV3.

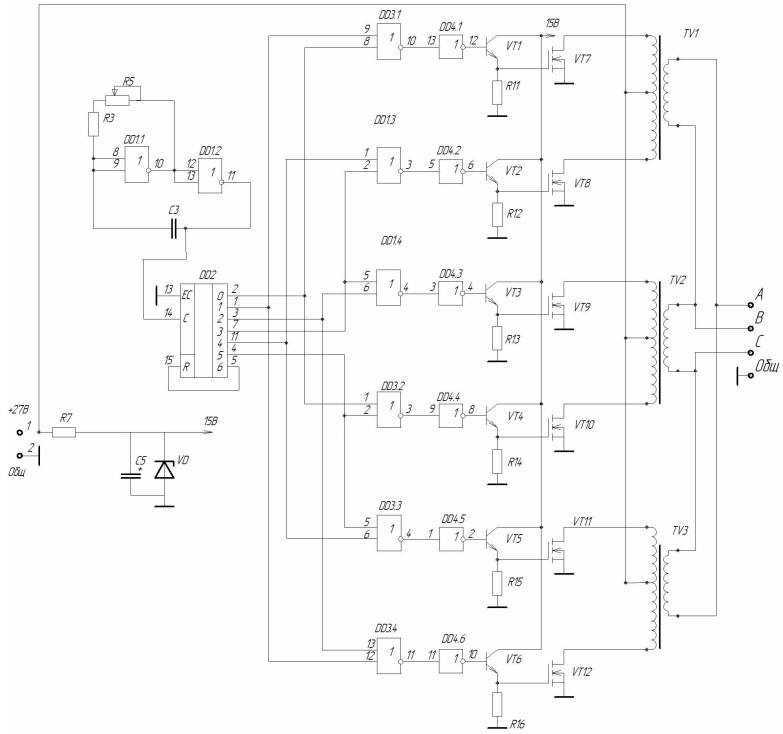


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема источника питания асинхронного двигателя вентилятора

К источнику питания АД подводится постоянное напряжение сети 27 В. С параметрического стабилизатора на стабилитроне VD напря-

жение питания +15 В поступает на микросхемы DD1-DD4 и транзисторы VT1-VT6.

Генератор на логических элементах DD1.1, DD1.2 с частотозадающей цепью R3R5C3 вырабатывает прямоугольные импульсы амплитудой 15 В, частотой 2400 Гц, из которых счетчик импульсов на микросхеме DD2 формирует управляющие трехфазные импульсы частотой 400 Гц на выводах 1–4, 7, 11.

Импульсы трехфазной последовательности, созданные с помощью логических элементов DD1.3, DD1.4 и микросхем DD3, DD4 и транзисторов VT1–VT6, поступают на затворы полевых транзисторов VT7–VT12. Трансформаторы TV1–TV3 повышают импульсное напряжение с 27 В до 220 В.

В программной среде *NI Multisim* проведено моделирование работы схемы источника питания АД с использованием виртуальных моделей электронных компонентов, целью которого являлось – отладка работы схемы и получении требуемых выходных параметров источника питания.

Результаты моделирования представлены на рис. 3, где при активно-индуктивной нагрузке приведены осциллограммы линейного напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} амплитудой 220 В, частотой 400 Гц.

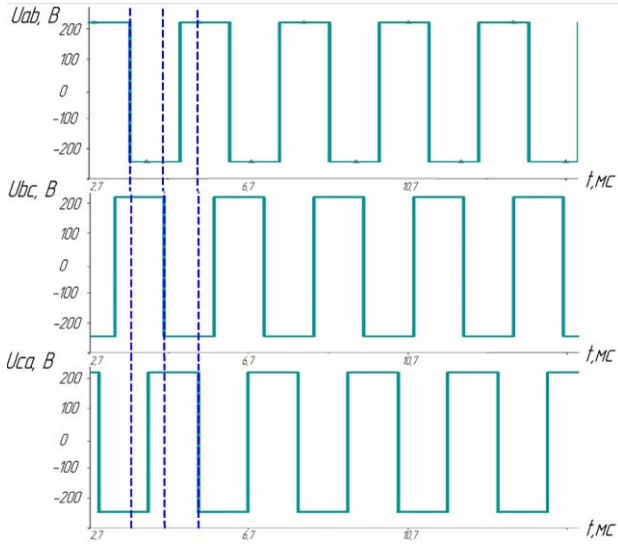


Рис. 3. Выходное напряжение источника питания асинхронного двигателя вентилятора

Разработана схема источника питания асинхронного двигателя вентилятора. Проведено ее моделирование в среде *NI Multisim*. Получено переменное трехфазное выходное напряжение амплитудой 220 В, частотой 400 Гц.

Список литературы

1. *Калинушкин*, *М. П.* Вентиляторные установки. – М. : Высш. шк., 1962. – 294 с.

2. *Рожанский*, *Л. Л.* Статические электромагнитные преобразователи частоты. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1959. – 96 с.

3. *Сидорчук*, *И. Н.* Частотные преобразователи // Насосы и принадлежности Россия. – URL: http://nasos-pump.ru/chastotnye-preobrazovateli-invertor (дата обращения: 17.11.2016).

Development of Power Supply for Asynchronous Fan Motor

The circuit of power supply for an asynchronous fan motor is developed and modeled in the NI Multisim. The required parameters of the output voltage are obtained.

Keywords: power supply; automatic control; electric fan; asynchronous motor

УДК 621.382

М. О. Кокуйский, студент
E-mail: hedgehog_94@mail.ru
А. А. Штин, кандидат технических наук, доцент
E-mail: shtin_a_a@istu.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Разработка стенда для измерения характеристик маломощных полевых транзисторов

Рассматривается проблема, связанная с высокой трудоемкостью ремонта приборов, имеющих в своем составе полевые транзисторы. Решение проблемы заключается в разработке стенда, который позволит определить работоспособность маломощных полевых транзисторов и измерить их основные характеристики.

Ключевые слова: цифровой милливольтметр В3-52/1; блок-схема; функциональная схема; монтаж элементов

При ремонте приборов лаборатория электрических измерений кафедры «Электротехника» сталкивается с проблемой высокой трудоемкости при ремонте средств измерений, в схемах которых используются полевые транзисторы. Ввиду отсутствия устройства для проверки работоспособности, определения характеристик и подбора пары полевых транзисторов, решить данную проблему не представляется возможным. В связи с этим было решено разработать стенд для проверки полевых транзисторов с описанными выше функциями [1, 2].

Стенд был разработан на базе цифрового милливольтметра В3-52/1. Рассмотрим блок-схему стенда (рис. 1).

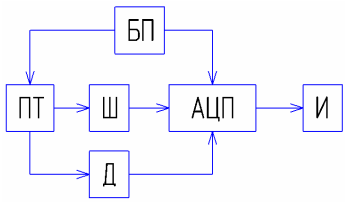


Рис. 1. Блок-схема стенда для измерения характеристик маломощных полевых транзисторов

© Кокуйский М. О., Штин А. А., 2017

Напряжения, снимаемые с делителя напряжения «Д» и шунта «Ш» полевого транзистора «ПТ», прикладываются к аналого-цифровому преобразователю «АЦП». Аналого-цифровой преобразователь и полевой транзистор, включенный по схеме с общим истоком, питаются от блока питания «БП». Результат измерения отображается на индикаторе «И», состоящем из четырехразрядного семисегментного индикатора.

Рассмотрим функциональную схему стенда (рис. 2).

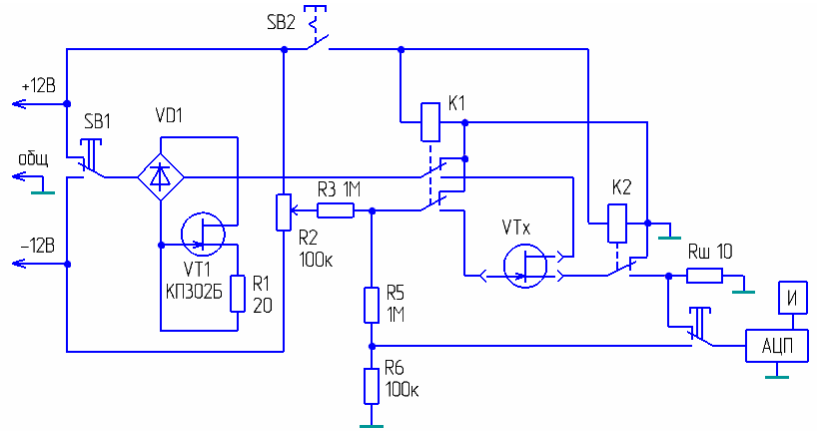


Рис. 2. Функциональная схема стенда для измерения характеристик маломощных полевых транзисторов

Для изменения значения напряжения на затворе используется переменный резистор R2, подключенный к двухполярному источнику питания, что дает возможность получать вольтамперную характеристику полевых транзисторов с каналами *p* и *n* типа. Переключатель SB1 изменяет полярность напряжения на стоке. Резистор R3 ограничивает ток затвора. Резисторы R5 и R6 выполняют функцию делителя напряжения, а Rш – измерительного шунта. Стоит заметить, что Rш включен в контакт истока измеряемого транзистора. Поскольку входное сопротивление полевого транзистора составляет мегаомы, то ток утечки затвора незначителен, следовательно, было сделано следующее допущение: $I_с = I_и$. Переключатель SB3 отвечает за переключение входа АЦП между делителем и измерительным шунтом. Для исключения перегрева измеряемого транзистора применен ограничитель тока стока на транзисторе VT1. Значение сопротивления резистора R1 подобрано таким образом, чтобы ограничитель тока стока срабатывал при значе-

нии 20 мА. Диодный мост обеспечивает работу ограничителя тока при любом положении переключателя SB1. Реле К1 и К2 выполняют функцию защиты измеряемого транзистора от статического электричества: пока не нажата кнопка SB2, транзистор не включен в схему измерения, а контакты для подключения транзистора замкнуты на общий провод.

Для измерения $U_{зи}$ и $I_с$ выбраны 2 предела измерения вольтметра В3-52/1:

– **10 мВ (положение $U_{зи}$)**: максимальное значение напряжения на входе АЦП составляет 2 В. Данный предел применяется для измерения напряжения сток-исток. При значении напряжении на входе АЦП, равном 2 В, индикатор выводит число 20. Примем размерность показаний индикатора на данном пределе в вольтах; т. к. напряжение затвор-исток варьируется в пределах от +12 до –12 В, коэффициент делителя выбран 1:10.

– **30мВ (положение $I_с$)**: максимальное значение напряжения на входе АЦП составляет 0,3 В. Данный предел применяется для измерения тока стока. При значении напряжении на входе АЦП, равном 0,3 В, индикатор выводит число 30. Примем размерность показаний индикатора на данном пределе в миллиамперах. Сопротивление измерительного шунта вычислим по формуле

$$R_ш = \frac{U_ш}{I_с} = \frac{0,3}{0,03} = 10 \text{ Ом},$$

где $R_ш$ – сопротивление измерительного шунта; $U_ш$ – падение напряжения на шунте; $I_с$ – ток стока.

Монтаж элементов данной схемы выполнен методом навесного монтажа на плате из фторопласта.

Плата, на которой выполнен усилитель постоянного тока милливольтметра В3-52/1, не оказывает влияния на работу АЦП. По этой причине она была извлечена из корпуса, и на ее место монтирована плата разрабатываемого устройства. На лицевую панель (рис. 3) выведены и обозначены органы управления данным устройством.

Выводы

1. Разработанный стенд поможет сократить время ремонта приборов лаборатории электрических измерений.

2. Исключены затраты на приобретение прибора, имеющего функции разработанного стенда.

Рис. 3. Лицевая панель прибора

Список литературы

1. *Титце, У.* Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк. – М. : Мир, 1983. – 512 с.

2. *Садченков, Д. А.* Современные цифровые мультиметры. – М. : СОЛОН-Р, 2001. – 107 с.

Development of the Stand for Measuring Low-Power Transistors Characteristics

In this report the problem connected with high labor inputs in repairing of the devices, which include field transistors, is considered. The solution is development of the stand which will allow to define operability of low-power field transistors and to measure their main characteristics.

Keywords: digital voltmeter B3-52/1; flowchart; function chart; installation of elements

УДК 621.7/.9:658

Н. С. Матросов, студент
E-mail: mnikitos95@mail.ru
В. А. Стародубцева, кандидат технических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Анализ путей повышения производительности и надежности работы металлообрабатывающего цеха

Выявлены и рассмотрены проблемы, связанные с технологическим процессом металлообрабатывающего цеха. Предусматриваются решения, позволяющие повысить производительность и улучшить условия труда.

Ключевые слова: анализ; цех; производство; улучшение

Металлообрабатывающий цех Ижевского механического завода выпускает следующую продукцию: различные зубчатые колеса, зубчатые рейки, шестеренки. Кроме того, в нем производят заготовки из различного металла для дальнейшей обработки изделий.

Анализ работы цеха в последние годы показал следующее:

1) не полностью выполняются в данном цехе возросшие требования к надежности электроснабжения и качеству электроэнергии, из-за чего снижается производительность и эффективность функционирования большинства станков;

2) возрос спрос на выпускаемую продукцию;

3) установленные в цехе станки не в состоянии обеспечить необходимые требования к качеству выпускаемой продукции;

4) значительно ухудшились условия труда на производстве – загрязненность воздуха и уровень освещения в цехе не удовлетворяют санитарным нормам и правилам.

В результате этого перед руководством цеха встал вопрос поиска путей устранения выявленных недостатков. Для решения данных проблем предлагается провести ряд мероприятий [1]:

С целью повышения надежности системы электроснабжения необходимо произвести реконструкцию системы электроснабжения цеха: проложить новые силовые распределительные сети цеха с обоснованным выбором питающих кабелей, заменить коммутационные и защитные аппараты на более надежные и современные [2].

© Матросов Н. С., Стародубцева В. А., 2017

Для увеличения объема производимой продукции в цехе предлагается установить дополнительно станки: долбежный, сверлильный, заточный и притирочный. Данные станки играют большую роль в производстве изделий из металла, а поэтому дополнительное оборудование ускорит производственный процесс всего предприятия в целом и повысит качество выпускаемой продукции.

Качество изделий значительно улучшится после установки лазерных станков. Для этих устройств характерна высокая точность реза. Кроме того, благодаря их применению удается добиться абсолютно гладкой поверхности кромки металла. Данный факт обусловлен тем, что использование оборудования для лазерной резки не предполагает механического воздействия на заготовку. Обработка материалов происходит быстро и с минимальными затратами.

3. Существенную роль в улучшении условий труда играет освещение цеха. Система общего освещения при равномерном размещении светильников может быть рекомендована:

1) в производственных помещениях при высокой плотности расположения цехового оборудования, если это оборудование не создает теней на рабочих поверхностях;

2) в производственных помещениях, где по всей площади выполняются однотипные работы;

3) в производственных помещениях, где работа не требует большого и длительного напряжения зрения (разряд V по СНиП [4]), а также во вспомогательных и складских помещениях.

К локализованному размещению светильников общего освещения прибегают в следующих случаях:

1) в производственных помещениях при расположении рабочих мест группами, размещенных на отдельных участках;

2) в производственных помещениях, в которых на отдельных участках выполняются работы различной степени точности, требующие различных уровней освещенности;

3) в производственных помещениях с большими по площади рабочими поверхностями, требующими высокой освещенности.

К числу источников света массового применения, выпускаемой нашей промышленностью, относятся лампа накаливания, люминесцентные лампы и лампы ДРЛ. Для приближения уровня освещения к оптимальным нормам желательно использовать лампы ДРЛ с более высокой степенью защиты от загрязнений [3].

Лампы ДРЛ несмотря на высокую световую отдачу и большой срок службы не обеспечивают удовлетворительной цветопередачи и поэтому могут быть рекомендованы для освещения производственных по-

мещений, в которых отсутствуют жесткие требования к правильной цветопередаче. К таким помещениям относится ряд цехов металлургической и машиностроительной промышленности большой высоты, в которых возникают трудности при обслуживании светильников. В этих случаях применение светильников с лампами, обладающими большим единичным световым потоком и большим сроком службы, весьма удобно, т. к. снижаются расходы на эксплуатацию осветительных установок.

Система комбинированного освещения имеет преимущества по сравнению с системой общего освещения. Светильники местного освещения расположены непосредственно у рабочих мест, что значительно упрощает их чистку, замену ламп, текущий ремонт осветительной установки. Местное освещение на рабочих местах, где в данный момент работа не производится, может быть выключено, что позволяет обеспечить экономичный расход электроэнергии.

4. Улучшения условий труда на производстве можно добиться установкой дополнительных вытяжных вентиляторов. В этом случае снижается уровень концентрации вредных примесей в воздухе, что благоприятно сказывается на здоровье рабочего персонала. Для поддержания оптимальной температуры в цеху рекомендуется установить калорифер.

Выводы

Выполнение всех предложенных мероприятий позволит увеличить производительность металлообработки деталей в 2–3 раза, значительно повысить качество выпускаемых изделий и добиться улучшенных условий труда.

Список литературы

1. *Барыбина*, *Ю. Г.* Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю. Г. Барыбина [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

2. *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.

3. *Айзингберг*, *Ю. Б.* Справочная книга по светотехнике. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 472 с.

4. СНиП 23 – 05 – 95. Естественное и искусственное освещение. – М. : Минстрой России, ГП ЦПП, 1995. – 69 с.

Analysis of Ways to Enhance the Performance and Reliability of the Metalworking Shop

In this paper, we identified and discussed issues related to the process of metalworking shop. Provision solutions to improve the production process.

Keywords: analysis; workshop; production; improvement

УДК 621.319.4

В. А. Морозов, кандидат технических наук, доцент
М. Л. Новоселов, аспирант
Б. И. Сибгатуллин, аспирант
Н. В. Туктарев, магистрант
E-mail: morozov_v_a@istu.ru; infinitus@istu.ru; bullatts@gmail.com; ia904@yandex.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Исследование характеристик ионистора для гибридного источника питания унифицированной машины технологического электротранспорта

Проведены экспериментальные и теоретические исследования зарядных и разрядных характеристик ионистора. Рассчитана фактическая емкость и энергия ионистора. Экспериментальные данные получены с помощью АЦП NI USB-6009 в среде графического моделирования LabVIEW. Проведены сравнения экспериментально полученных данных с результатами, промоделированными в программной среде Multisim.

Ключевые слова: ионистор; характеристика заряда; характеристика разряда; электротранспорт; *Maxwell*

Введение

В рамках выполнения проекта проводились измерения характеристик заряда и разряда ионистора фирмы *Maxwell* $U = 48$ В, $C = 165$ Ф, $Wh = 53$ ВтЧ [1]. Заряд ионистора осуществлялся от источника питания *Delta Elektronika* 1200-S48 напряжением 48 В.

В гибридных источниках питания, ионистор используется совместно с аккумуляторной батареей [2]. При этом ионистор используется для питания электродвигателя в моменты пиковых потреблений тока [3]. Количество энергии, отдаваемое ионистором в схему, будет зависеть от величины его заряда.

Основная часть

Для получения характеристики заряда ионистора ключ S1 (рис. 1) замыкается, а S2 размыкается. При снятии характеристик источник питания E подключается через резисторы R1 и R2 к ионистору C1. Со-

© Морозов В. А., Новоселов М. Л., Сибгатуллин Б. И., Туктарев Н. В., 2017

Статья издается в соответствии с выполнением договора № 02.G25.31.0132 «Разработка и создание высокотехнологичного производства унифицированной машины технологического электротранспорта».

противления R1 = 2,14 Ом и R2 = 0,61 Ом используются для ограничения зарядного тока.

По окончании заряда ключ S1 размыкается.

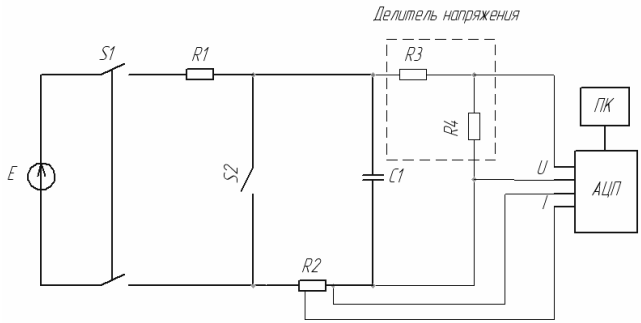


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная

С отвода резистора R2 снимается напряжение, прямо пропорциональное току, а с ионистора напряжение заряда и разряда через делитель R3 = 10 кОм и R4 = 5 кОм. Регистрация значений производится на персональном компьютере при помощи АЦП NI USB-6009, графики заряда и разряда (рис. 2) строятся в среде графического программирования *LabVIEW*. Для дальнейшего анализа, результаты измерения также экспортируются в табличном формате для программы *Excel*.

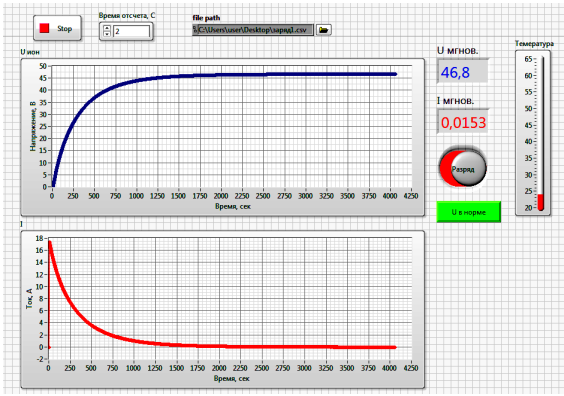


Рис. 2. Лицевая панель виртуального прибора для снятия зарядных и разрядных характеристик ионистора

Максимальная амплитуда тока заряда определяется по закону Ома и равна 17,45 А.

При дальнейшем заряде ионистора ток уменьшается, а напряжение на ионисторе возрастает до 48 В (рис. 3).

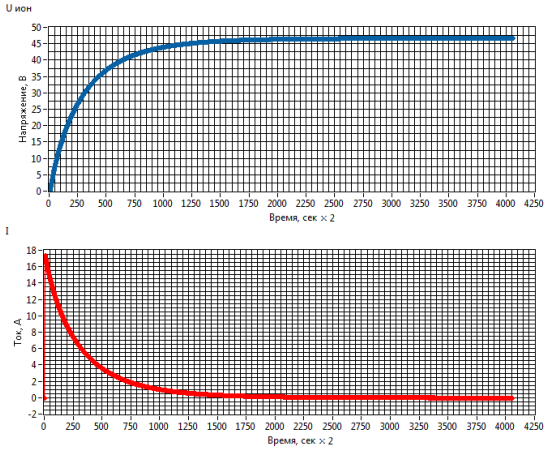


Рис. 3. График зарядных характеристик тока и напряжения ионистора

Для получения разрядных характеристик замыкается ключ S2. Разряд ионистора производится на резистор R2. Мгновенное значение тока разряда ионитора (рис. 4) снимается с отвода резистора R2 = 0,15 Ом, а напряжение с клемм ионистора и строится график экспериментальных значений (рис. 5).

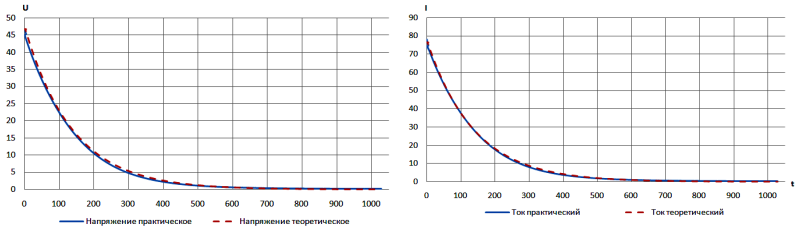


Рис. 4. Совмещенные графики характеристик разряда ионитора

Максимальная амплитуда тока разряда определяется по закону Ома и равна 78,69 А.

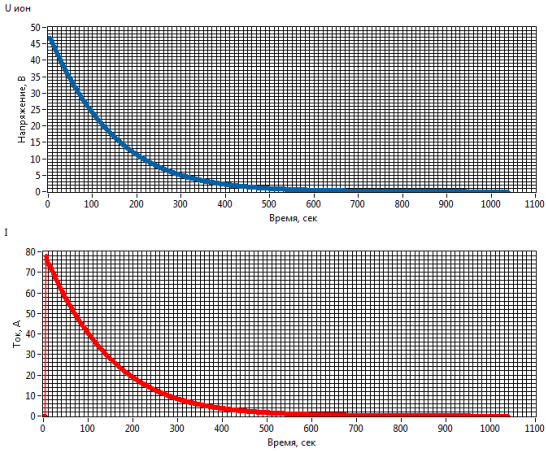


Рис. 5. График разрядных характеристик тока и напряжения ионистора

По полученным зарядным и разрядным характеристикам рассчитывается фактическая емкость и энергия ионистора.

Мгновенное напряжение на ионисторе при заряде от источника напряжения, согласно RC-модели, описывается формулой

$$U_{\text{зар}} = U_0\left(1 - e^{\frac{t}{\tau}}\right), \tag{1}$$

где U_0 – напряжение источника питания, В; t – время заряда ионистора, с; τ – постоянная времени заряда ионистора, с.

Постоянная времени заряда описывается формулой

$$\tau = RC. \tag{2}$$

В момент времени $\tau = t$ напряжение заряда равно

$$U_{\text{зар}} = 0,63U_0 = 0,63 \cdot 48 = 30,24 \text{ В}.$$

Для рассчетоного значения напряжения U = 30,24 В соответствует значение времени τ = 614 с (рис. 3).

Расчетная емкость ионистора находится по формуле (2):

$$C_{\text{зар}} = \frac{\tau}{R} = \frac{614}{2,75} 223,3 \text{ Ф}.$$

Расчет емкости ионистора производятся по цепи разряда. Мгновенное напряжение на ионисторе при разряде согласно RC-модели описывается формулой

$$U_{\text{разр}} = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (3)$$

В момент времени $\tau = t$ напряжение разряда равно

$$U_{\text{разр}} = \frac{U_0}{2,718} = \frac{48}{2,718} = 17,66 \text{ В}.$$

Для расчетного значения напряжения $U_{\text{разр}}$ = 17,66 В соответствует значение времени τ = 140 с (рис. 5).

По формуле (2) находится расчетная емкость ионистора по цепи разряда:

$$C_{\text{разр}} = \frac{\tau}{R} = \frac{140}{0,61} = 229,5 \text{ Ф}.$$

Для уменьшения погрешности измерения усредняем вычисленные значения емкостей ионистора:

$$C_{\text{ср}} = \frac{C_{\text{зар}} + C_{\text{разр}}}{2} = \frac{229,5 + 223,3}{2} = 226,4 \text{ Ф} \approx 226 \text{ Ф}.$$

По значению расчетной фактической емкости ионистора проводится моделирование характеристик заряда и разряда в программной среде *Multisim*. По полученным значениям строятся графики теоретических зарядных и разрядных характеристик в программе *Excel*. Для наглядного сравнения экспериментальных и теоретических результатов характеристики накладываются друг на друга (рис. 4, 6).

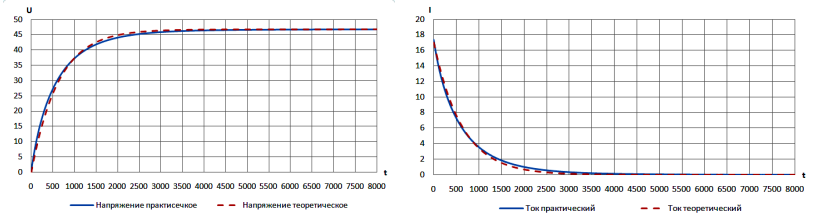


Рис. 6. Совмещенные графики характеристик заряда ионистора

По полученным данным можно рассчитать фактическую емкость ионистора двумя способами:

$$W = \int i^2(t)Rdt = 260\,538,94 \text{ Дж} = 72,95 \text{ Вт} \cdot \text{ч};$$

$$W = \frac{C_{\text{ср}}U^2}{2} = \frac{226 \cdot 48^2}{2} = 260\,352 \text{ Дж} = 72,38 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Выводы

В ходе проведения исследования составлена схема и методика проверки характеристик заряда и разряда ионистора. По полученным данным построены графики характеристик, рассчитана фактическая емкость и энергия ионистора.

По расчетной емкости ионистора произведено моделирование характеристик заряда и разряда ионистора в программе *Multisim*.

Произведены сравнения полученных экспериментальных и теоретических данных, экспериментальные и теоретические данные практически идентичны, погрешность измерения составила 3 %.

Энергия и емкость ионистора, полученные экспериментальным путем, оказались выше номинального:

– емкость на 13 %

– энергия на 37 %.

Погрешности измерений вызваны температурным нагревом проводников и резисторов.

Список литературы

1. *Maxwell*. Ultracapacitors Data sheets and technical information for 1,000 and 2,500 Farads [Maxwell publications]. – San Diego, CA 92123 USA.

2. *Григорьев, В.* Ионисторы + аккумуляторы – особенности применения // Электронные компоненты. – 2001. – № 1. – С. 215–309.

3. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство / В. Кузнецов, О. Панькина, Н. Мачковская, Е. Шувалов, И. Востриков // Компоненты и технологии. – 2005. – № 6. – С. 355–436.

Investigation of Characteristics of Supercapacitors for Hybrid Power Supply of Unified Technological Electric Vehicle

The article is devoted to experimental and theoretical studies of charge and discharge characteristics of the supercapacitors. Actual capacity and energy of supercapacitor is calculated. Experimental data is obtained by the ADC NI USB-6009 in the LabVIEW graphical modeling environment. The experimental data obtained and the results simulated by Multisim software environment are compared.

Ключевые слова: supercapacitor; charge characteristic; discharge characteristic; Electric Vehicle; Maxwell

УДК 004.312

В. А. Орлов, студент
E-mail: Fledof@mail.ru
В. А. Стародубцева, кандидат технических наук, доцент
М. В. Тюлькин, старший преподаватель
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Использование ультразвукового дальномера при исследовании режимов работы таймеров микроконтроллеров *AVR*

Рассматривается один из основных режимов работы таймеров микроконтроллеров AVR. Для наглядности работы таймера использован стенд ультразвукового дальномера, выполненный на микропроцессоре ATMEL ATmega16.

Ключевые слова: микроконтроллер *AVR*; *ATMEL ATmega16*; таймеры; ультразвуковой датчик

Человеческое ухо воспринимает распространяющиеся в среде упругие волны частотой приблизительно до 16 000 колебаний в секунду (Гц); колебания с более высокой частотой представляют собой ультразвук (за пределом слышимости ухом человека). Ультразвук – упругие звуковые волны высокой частоты. Обычно ультразвуковым диапазоном считают полосу частот от 20 000 до нескольких миллиардов герц [1–4].

Принцип действия ультразвуковых датчиков расстояния основан на излучении импульсов ультразвука и измерении, пока звуковой импульс, отразившись от объекта измерения, вернется обратно в датчик. Датчик HC-SR04 генерирует узконаправленный сигнал на частоте 40 кГц и ловит отраженный сигнал (эхо). По времени распространения звука до объекта и обратно можно достаточно точно определить расстояние до него. При этом достигается разрешения до 0,2 мм.

Благодаря тому, что пьезоэлектрический преобразователь может служить как излучателем, так и приемником ультразвуковых импульсов появляется возможность создать ультразвуковые датчики расстояния с одним преобразователем. Такой преобразователь сначала излучает короткий ультразвуковой импульс. Одновременно с этим в датчике запускается внутренний таймер. Когда отраженный от объекта ультразвуковой импульс вернется обратно в датчик, таймер останавливается. Время, прошедшее между моментом излучения импульса и моментом,

© Орлов В. А., Стародубцева В. А., Тюлькин М. В., 2017

когда отраженный импульс вернулся в датчик, служит основой для вычисления расстояния до объекта. Полный контроль за процессом измерения производится с помощью микропроцессора, обеспечивающего высокую линейность измерений. Наиболее важными особенностями применений ультразвуковых датчиков служит их возможность измерять расстояния до таких сложных объектов как, например, сыпучие вещества, жидкости, гранулы, прозрачные или, напротив, сильно отражающие поверхности. В дополнение ультразвуковыми датчиками можно измерять сравнительно большие расстояния, при этом сохраняя их небольшие размеры, что может быть существенно для ряда применений.

В каждом *AVR*-микроконтроллере имеются таймеры, и их количество может варьироваться от одного до четырех. Все таймеры можно условно разбить на два типа: таймеры общего назначения и так называемые сторожевые таймеры. Сторожевые таймеры используются для обеспечения возобновления работы микроконтроллера в случае, если тот «зависает» в результате ошибки в исполняемом коде либо из-за внешних помех. Таймеры общего назначения используются для формирования сигналов различной длительности и формы, также таймеры общего назначения могут осуществлять счет количества тактовых импульсов и выступать в роли счетчика, за это эти таймеры еще называют таймерами-счетчиками.

Всего существует 6 режимов работы таймеров:

1. Режим *Normal*;
2. Режим *Capture* (Захват);
3. Режим *CTC* (сброса при совпадении);
4. Режим *Fast PWM* (Быстродействующей ШИМ);
5. Режим *Phase Correct PWM* (ШИМ с точной фазой);
6. Асинхронный режим.

В исследуемом случае будет использован первый, самый легкий режим – *Normal*.

В этом режиме таймер производит подсчет приходящих на его вход импульсов (от тактового генератора или внешнего устройства) и вызывает прерывание по переполнению. Микроконтроллер подает на вход «TRIG» датчика импульс высокого уровня длительностью 10–15 микросекунд. Датчик отправляет ультразвуковой сигнал из восьми коротких импульсов частотой выше предела диапазон слуха человека, в это же время запускается внутренний таймер микроконтроллера, начиная отсчет времени. После приема отраженного сигнала ультразвуковой датчик HC-SR04 формирует выходной сигнал. Спустя примерно микросекунду ультразвуковой датчик HC-SR04 выдает на выходе «ECHO» импульс высокого уровня длительностью до 38 миллисекунд. Если

препятствий не обнаружено, то на выходе будет сигнал с длительностью 38 мс, далее происходит прерывание таймера и передача полученного значения в регистр микроконтроллера для дальнейшей обработки. В технической документации устройства производителем предоставлена формула для расчета расстояния:

$$S = \frac{T}{58},$$

где S – расстояние в сантиметрах; T – длительность импульса в микросекундах; 58 – константа, заявленная производителем.

Таким образом, для работы с датчиком от электроники прибора требуется один цифровой управляющий выход и один вход для сигнала датчика. Вывод «ECHO» нужно подключить к выводу внешнего прерывания или входу схемы захвата таймера в зависимости от метода измерения длительности сигнала микроконтроллером.

Проведенные исследования были использованы при создании лабораторного стенда с микроконтроллером *AVR*.

Вывод

В качестве обрабатывающего устройства ультразвукового датчика может быть использован микроконтроллер *AVR* с таймером, работающий в любом из шести режимов работы.

Список литературы

1. ATmega16 Datasheet // ATMEL Corporation. – URL: http://www.atmel.com /ru/ru/Images/doc2466.pdf (дата обращения: 8.12.2016).

2. *Мортон*, *Дж*. Микроконтроллеры AVR. Вводный курс / пер. с англ. – М. : Додека – XXI», 2006. – 272 с.

3. *Прокопенко*, *В. С*. Программирование микроконтроллеров ATMEL на языке С. – М. : МК-Пресс, 2012. – 320 с.

4. HC-SR04 Datasheet – Ultrasonic ranging module HC-SR04. – URL: http://www. micropik.com/PDF/HCSR04.pdf (дата обращения: 8.12.2016).

The Use of Ultrasonic Rangefinder in the Study of Operating Modes of the AVR Timers

In the paper, one of the main modes of operation of the AVR timers is considered. For clarity of the timer operation, the ultrasonic rangefinder stand made on the microprocessor ATMEL ATmega16 is used.

Ключевые слова: microcontroller AVR; ATMEL ATmega16; timers; an ultrasonic sensor

УДК 621.35(045)

И. Д. Родионов, студент
E-mail: rodionov.94@mail.ru
А. В. Морозов, старший преподаватель
E-mail: avmoroz16@ramblerl.ru
В. А. Морозов, кандидат технических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Алгоритм совместной работы аккумулятора, ионистора и тягового электродвигателя технологического электротранспорта

Представлен алгоритм совместной работы аккумулятора, ионистора и тягового электродвигателя для достижения максимальных энергетических характеристик.

Ключевые слова: ионистор; алгоритм; рекуперация; технологический транспорт

В настоящее время достаточно актуальна проблема экономии электроэнергии. При современных объемах ее потребления, экономия даже нескольких процентов может дать существенный экономический эффект. Одним из вариантов снижения энергопотребления является применение новых материалов и компонентов, повышения КПД различных преобразующих устройств.

Совместное использование аккумуляторов и ионисторов позволяет получить источник энергии, который обладает их преимуществами и при этом лишен их недостатков. К достоинствам ионистора, по сравнению с аккумулятором, можно отнести: эксплуатацию в широком интервале температур, ионистор не нуждается в обслуживании в течение всего срока службы, имеет большое количество циклов «заряда – разряда» без заметного ухудшения параметров. Полный разряд ионистора не приводит к ухудшению параметров, а для зарядного тока и напряжения нет жестких ограничений, как у аккумулятора. Время разряда ионисторов измеряется в секундах, поэтому они хорошо подходят для кратковременного питания устройства большим током [1]. Хотя ионисторы являются полярными элементами, но в отличие от

© Родионов И. Д., Морозов А. В., Морозов В. А., 2017

Статья издается в соответствии с выполнением договора № 02.G25.31.0132 «Разработка и создание высокотехнологичного производства унифицированной машины технологического электротранспорта».

аккумуляторов, приложение обратного напряжения не оказывает негативного воздействия. Особое значение при его использовании в силовых схемах имеет внутреннее сопротивление. По сравнению с электролитическими конденсаторами оно велико, но меньше чем у аккумуляторов [2]. В зависимости от требуемых параметров системы может быть реализована последовательная или параллельная схема включения ионистора и аккумулятора.

Последовательная схема включения позволяет отказаться от внешних индукторов, т. к. весь коммутируемый ток проходит через обмотку электродвигателя. Применение параллельной схемы включения открывает возможность подключить блок ионисторов напряжением большим или меньшим напряжения аккумулятора. Использование двойного преобразователя напряжения позволяет управлять распределением энергии между ионистором, аккумулятором и электродвигателем [3]. Такая схема реализует эффективную схему рекуперативного торможения. Способность ионисторов к практически мгновенной перезарядке позволяет поглотить практически всю кинетическую энергию из тормозной системы. Запасенная электрическая энергия обеспечивает дополнительную мощность при ускорении (рис. 1).

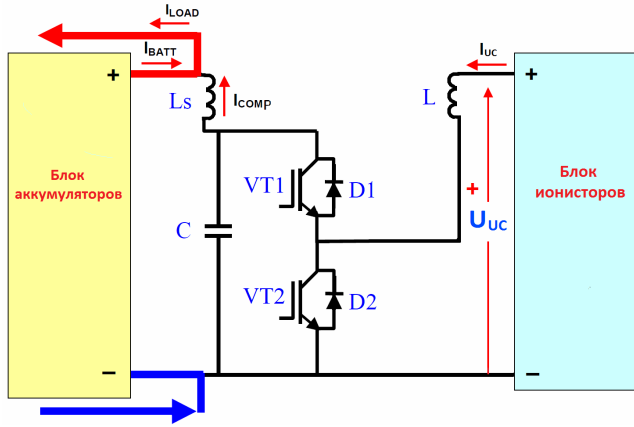


Рис. 1. Схема включения ионистора и аккумулятора

Принимая во внимание высокую стоимость ионисторов, суммарную емкость в фарадах нужно свести к минимуму. Поскольку накопленная в этом случае энергия ограничена, требуется сложный алгоритм управления. Учитываются мгновенное напряжение, состояние

заряда и мгновенный ток батареи, начальные условия ионистора, скорость транспортного средства. Состояние заряда оценивается интегрированием тока батареи (положительного или отрицательного) по времени. Измеряя мгновенное напряжения аккумуляторной батареи и знак тока нагрузки контроллер распознает, в каком режиме должен работать преобразователь.

Для принятия соответствующих решений в каждой конкретной ситуации используется двухуровневое комбинированное управление (рис. 2). Основной уровень устанавливает опорный ток I_{REF} для каждого режима работы. Вспомогательный уровень генерирует ШИМ сигнал для преобразователя напряжения.

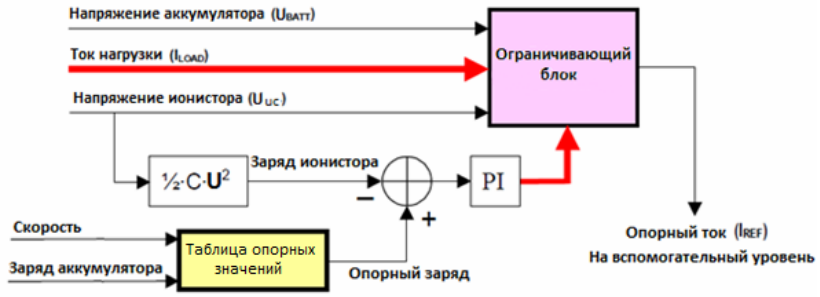


Рис. 2. Схема основного уровня комбинированного управления

Запасенная в ионисторе энергия пропорциональна U_{UC}^2, его напряжение дает представление об оставшемся заряде. Сигнал ошибки между опорным и фактическим зарядом передается через PI-регулятор, который задает величину опорного тока (I_{REF}), необходимого для поддержания требуемого количества энергии в ионисторе.

Опорный ток определяет величину тока I_{COMP}, необходимого для компенсации мощности. Опорный ток I_{REF} изменяется: если напряжение батареи U_{BATT} превышает минимальное или максимальное значение; когда напряжение ионистора U_{UC} слишком низкое или слишком высокое; когда ток нагрузки I_{LOAD} превышает максимальные абсолютные значения, установленные для аккумуляторной батареи (I_{BATT}) (рис. 3).

Проанализировав возможные ситуации, составлен алгоритм взаимодействия аккумулятора, ионистора и электродвигателя для достижения максимальных энергетических показателей (рис. 4).

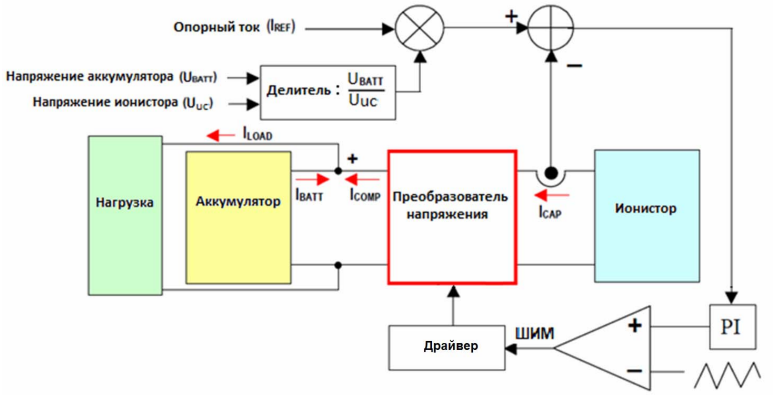


Рис. 3. Схема вспомогательного уровня комбинированного управления

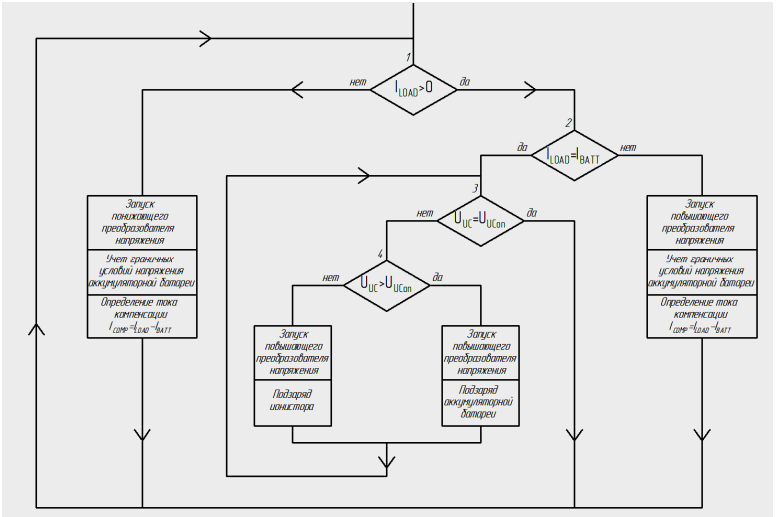


Рис. 4. Алгоритм совместной работы

Вывод

Выбрана параллельная схема включения аккумулятора и ионистора. Оформлен алгоритм взаимодействия аккумулятора, ионистора и тягового электродвигателя. Полученные результаты будут использованы при создании прототипа транспортного средства.

Список литературы

1. *Кузнецов*, *В*. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство / В. Кузнецов, О. Панькина, Н. Мачковская // Компоненты и технологии. – 2005. – № 6. – С. 12–16.

2. *Балыкшов*, *А*. Ионисторы // Электронные компоненты – Украина. – 2005. – № 11. – С. 91–97.

3. *Bo Chen*, *B. S.* Ultracapacitor boosted fuel cell hybrid vehicle. Wuhan University, 2009. – 117 p.

The Algorithm of Battery, Ultracapacitors and Traction Motor Technological Vehicle Teamwork

This paper presents the algorithm of battery, ultracapacitors and traction motor technological vehicle teamwork for maximum energy characteristics.

Keywords: ultracapacitor; algorithm; recuperative braking; technological vehicle

УДК 621.35(045)

Н. П. Серафимов, студент
E-mail: nikolas-mr@mail.ru
В. А. Стародубцева, кандидат технических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Обоснование экономичности использования регулируемого частотного электропривода для насосов теплового пункта

Рассматриваются проблемы, связанные с технологически устаревшими методами регулирования движения воды в центральных тепловых пунктах. Альтернативным методом для повышения эффективности работы технологического оборудования предусматривается внедрение в состав электропривода насоса преобразователей частоты.

Ключевые слова: центральный тепловой пункт; частотный преобразователь; датчик давления; частотно-регулируемый электропривод

Для обеспечения движения воды по контурам горячего водоснабжения (ГВС) и отопления служат соответствующие насосы, насосами осуществляется и подача воды, а также подпитка контура отопления. Все это оборудование размещается в тепловом пункте. Для обеспечения пересечения этих контуров, для размещения насосов, теплообменников, датчиков температуры и давления в контурах, на прямой и обратной линиях необходимо поддерживать требуемые параметры на заданном уровне [1, 2].

Необходимость модернизации котельных диктуется изношенностью оборудования, завышенной мощностью котлового и насосного оборудования, зачастую в несколько раз превышает потребности потребителей, что влечет за собой сверхнормативные потери и неоправданные затраты.

Традиционно регулирование движения воды осуществляется дросселированием, т. е. изменением гидравлического сопротивления сети или, проще говоря, изменением положения задвижки. При использовании данного способа регулирования для уменьшения производительности насоса необходимо прикрыть задвижку. Очевидно, что при снижении производительности уменьшается мощность на выходе насоса, т. е. полезная мощность, при этом подводимая к насосу мощность

© Серафимов Н. П., Стародубцева В. А., 2017

не меняется, т. к. при закрытой задвижке насос продолжает работать. Таким образом, регулирование дросселированием значительно снижает КПД насосного агрегата. При таком режиме работы насосов управление сводится к определенному алгоритму: переключение работы оборудования по расписанию для поддержания температуры и давления воды, что приводит к значительному увеличению обслуживающего персонала.

Полезную мощность и частоту вращения насоса можно регулировать следующими способами:

– регулированием скорости вращения вала механизма без изменения скорости вращения магнитного поля двигателя (например, регулирование гидромуфтой);

– добавочными сопротивлениями в роторных цепях двигателя;

– используя электропривод с частотным регулированием.

Сравнивая варианты, можно сделать следующие выводы: использование регулируемых резисторов в роторе требует применения электродвигателя с фазным ротором, который, как правило, не используется для привода насоса. Кроме того, скользящий контакт ротора обычно является источником неплановых отказов. Использование гидромуфты требует постоянного обслуживания и ремонта (особенно резиновых уплотнителей), поэтому частотно-регулируемый привод имеет не только энергетические, но и эксплуатационные преимущества.

Возможность управления частотой вращения короткозамкнутых асинхронных электродвигателей была доказана сразу же после их изобретения. Реализовать эту возможность удалось лишь с появлением силовых полупроводниковых приборов – сначала тиристоров, а позднее транзисторов *IGBT*. В настоящее время во всем мире широко реализуется способ управления асинхронным двигателем путем изменения частоты питающего напряжения. Этот способ регулирования обеспечивает экономию энергии, а также совершенствование управления технологическим процессом.

Эффективность работы насосного агрегата в рабочем диапазоне определяется способом регулирования и характеристиками системы. Наиболее эффективный способ регулирования предусматривает использование в составе электропривода преобразователей частоты. Благодаря этому можно обеспечить автоматическое регулирование частоты вращения от датчика давления. Преобразователь частоты по сигналу от датчика давления, установленного в напорном трубопроводе, автоматически изменяет частоту вращения рабочего колеса насоса, оперативно реагируя на изменение расхода жидкости и обеспечивая поддержание заданного давления с высокой точностью. Потребление

электроэнергии при таком способе регулирования пропорционально кубу производительности насоса.

Частотно-регулируемый привод дает ряд других преимуществ:

– экономию тепла в системах горячего водоснабжения за счет потерь воды, несущей тепло;

– возможность создания при необходимости напор выше основного;

– уменьшение износа основного оборудования за счет плавных пусков;

– устранение гидравлических ударов при изменении напора;

– снижается в два раза количество мелких ремонтов основного оборудования из-за анализа эксплуатации регулируемого электропривода;

– снижение шума;

– возможность комплексной автоматизации систем водоснабжения.

Регулирование насосного оборудования методом частотного регулирования позволяет не только экономить энергию, но и оптимизировать технологические процессы перекачивания воды в системах ГВС и отопления.

Выводы

Анализируя опыт эксплуатации оборудования, можно сделать вывод, о преимуществах применения частотно-регулируемого электропривода:

– экономия электроэнергии в зависимости от режима работы объекта достигает 5–50 %, потери воды и тепла снижаются на 5–10 %;

– существенно снижается количество аварийных ситуаций, связанных с порывами трубопроводов;

– продлевается срок службы технологического оборудования и электрических двигателей.

Список литературы

1. *Лезнов*, *Б. С.* Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. – М. : Энергоатомиздат, 2006. – 359 с.

2. *Будков*, *А. А.* Оценка эффективности использования систем учета, автоматизации и регулирования тепловой энергии с целью повышения энергоэффективности объектов жилищно-коммунального хозяйства / А. А. Будков, Г. И. Прокофьева // Проблемы современной науки и образования. – 2016. – № 07(49). – 23 с.

Substantiation of Efficiency of Use of Frequency Controlled Electric Pumps for Heat Supply Station

In this work, the problems connected with technologically obsolete methods of traffic regulation of water in central heat distribution stations are considered. The alternative method, for increase in overall performance of processing equipment, provides implementation structure of the electric drive of the pump of converters of frequency.

Keywords: central heat distribution station; frequency converter; pressure sensor; frequency and adjustable electric drive

УДК 007.52

М. В. Симонов, аспирант
E-mail: simonov_marat@mail.ru
К. В. Шишаков, кандидат физико-математических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
Д. А. Сапегин, начальник отдела
С. В. Денисов, инженер-программист 3-й категории
В. А. Казанцев, инженер-программист 3-й категории
ООО «Ижевский институт комплексного приборостроения»

Разработка алгоритма свободного передвижения автономного передвижного устройства с возвратом на исходную точку

Рассмотрена разработка мобильного робота, способного перемещаться в автономном режиме в заданную область пространства (контрольную точку) и возвращаться в начальную точку. Мобильный робот способен передвигаться в незнакомом помещении, обходить препятствия и запоминать пройденный путь. Данная робототехническая система предназначена для перемещения в закрытом помещении в рамках одного этажа.

Ключевые слова: автономный мобильный робот; алгоритм передвижения; возврат на исходную точку; алгоритм обхода препятствий; навигация; ориентация в пространстве

Одним из приоритетных направлений робототехники является реализация функции автономности роботов и робототехнических систем. Для автономного передвижения, робототехническая система должна обладать системой навигации. Развитие технологий локальной навигации, позволяет осуществить оценку координат не только самого робота, но и окружающих его объектов, что представляет собой крайне важную и актуальную задачу [1–3].

Одними из важнейших областей применения автономных мобильных роботов является борьба с терроризмом, поиск пострадавших в завалах, разминирование мин и др.

Рассмотренный в данной работе передвижной робот представляет собой металлическую танковую платформу *T'Rex Tank Chassis*, оснащенную драйвером двигателя *Dagu T'Rex Motor Controller*, двумя двигателями, двумя литий-полимерными (Li-Pol) аккумуляторными бата-

© Симонов М. В., Шишаков К. В., Сапегин Д. А., Денисов С. В., Казанцев В. А., 2017

реями, одноплатным микрокомпьютером *Raspberry Pi Model A* и измерительными датчиками. В качестве измерительных датчиков использованы шесть ультразвуковых дальномера HC-SR04, одометр и инерциальное измерительное устройство на основе микросхем L3GD20H трехосевого гироскопа, LSM303D трехосевого акселерометра, трехосевого магнитного датчика. Для связи с персональным компьютером по средствам Wi-Fi соединения, на мобильный робот установлен *USB*-адаптер Wi-Pi, обеспечивающий беспроводной протокол передачи данных 802.11n, со скоростью передачи данных до 150 Мбит/с. Управление роботом осуществляется при помощи микрокомпьютера *Raspberry Pi*. Для снижения нагрузки управляющего модуля обработка данных происходит на персональном компьютере.

Для реализации функции автономного передвижения мобильного робота с возвратом на исходную точку необходимо решить следующие задачи:

– разработать алгоритм обхода препятствий;

–обеспечить построение карты местности (карты препятствий);

– производить запоминание пройденного пути.

Для оптимального обхода препятствий ультразвуковые дальномеры установлены особым образом (рис. 1). На каждую сторону подвижной платформы установлено по одному датчику, два других датчика повернуты относительно передней стороны платформы на 45° налево и направо. Тем самым реализован так называемый «буфер безопасности», позволяющий роботу вовремя обнаруживать препятствия и не сталкиваться с ними.

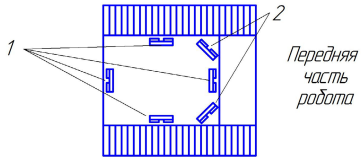


Рис. 1. Расположение ультразвуковых дальномеров: *1* – ультразвуковые дальномеры, на сторонах платформы; *2* – ультразвуковые дальномеры, повернутые направо и налево под 45°

Для начала движения требуется задать область, в которую необходимо попасть, затем с компьютера подать команду «Старт». После выполнения этих действий робот построит оптимальные пути и начнет движение в заданную область (рис. 2). Оптимальных путей может быть несколько, и путь, по которому робот начнет движение, выбирается случайным образом (рис. 3).

При возникновении препятствия в поле зрения (порядка 30 см) для обхода препятствия робот совершит маневр. Из рис. 4, *а* видно, что при возникновении препятствия робот повернет в одну из сторон. Сторона, в которую он повернет, выбирается случайным образом. По мере

движения мобильный робот будет стараться выстраивать наиболее оптимальный путь, что можно увидеть на рис. 4, *б*. При попадании в тупик робот сдаст назад и проложит новый путь.

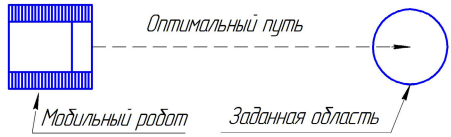


Рис. 2. Построение оптимального пути

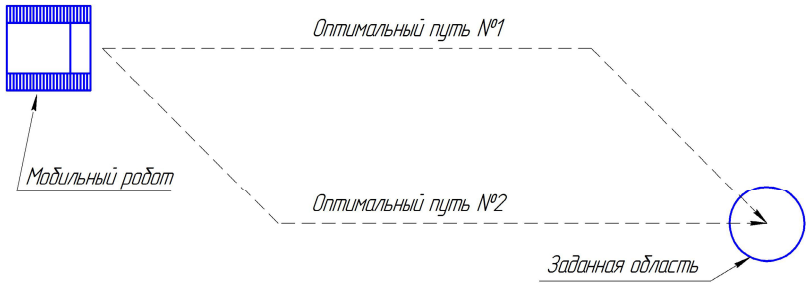


Рис. 3. Варианты оптимальных путей

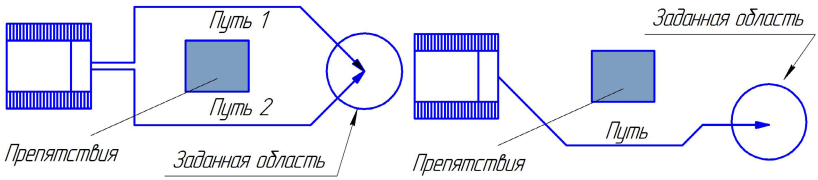


Рис. 4. Построение пути: поворот налево или направо (*а*); обход препятствия по наиболее краткому пути (*б*)

При передвижении роботом строится карта местности, на которой частично отображены зафиксированные препятствия (рис. 5).

Для изучения помещения и препятствий, находящихся в нем, роботу нужно отдать соответствующую команду. Только при этом условии (создание/наличие полной карты местности) можно рассчитывать на построение оптимального пути передвижения.

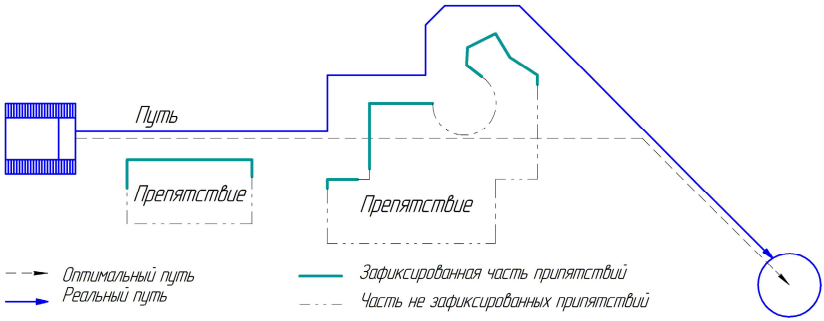


Рис. 5. Построение карты местности

При помощи одометра и инерциальной измерительной системы реализована функция запоминания пройденного пути, т. е. происходит периодическое фиксирование местоположения робота в пространстве, отслеживание направления движения, скорости движения, угла поворота, ускорения и пройденного расстояния. При достижении роботом заданной области пространства (контрольной точки) робот способен вернуться в исходную точку по ранее пройденному запомненному пути.

Данный алгоритм отработан на мобильном роботе, описанном выше. Точность попадания в контрольную точку и возврата в исходную является достаточно низкой. Низкая точность связана с накоплением ошибки инерциальной измерительной системы вследствие дрейфа. Данная робототехническая система нуждается в доработке. Дальнейшая доработка системы видится в добавлении различных типов измерительных устройств (датчиков), что позволит увеличить точность навигации.

Список литературы

1. *Курганов*, *С. М.* Разработка системы управления и навигации мобильного робота для движения в априори неизвестной среде // Современные техника и технологии XX : Междунар. науч.-практ. конф. Секция 7: Информатика и управление в технических системах. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2014. – С. 199–200. – URL: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2014/C01/V2/097.pdf (дата обращения: 10.11.2016).

2. *Кучерский*, *Р. В.* Модели и алгоритмы картографирования среды и планирования движений автономных мобильных роботов для мониторинга лабиринтов : дисс. … канд. техн. наук. – М., 2014. – 140 с. – URL: http://dlib.rsl.ru/01007507937 (дата обращения: 14.11.2016).

3. *Костишин*, *М. О.* Автономная навигация мобильного робота на основе ультразвукового датчика измерения расстояний / М. О. Костишин, И. О. Жа-

ринов, В. Д. Суслов // Науч.-техн. вестн. информац. технологий, механики и оптики. – 2013 – № 2(84). – С. 162–163. – URL: http://ntv.ifmo.ru/file/article/4141.pdf (дата обращения: 17.11.2016).

Development of Algorithm of Free Movement of the Autonomous Mobile Device to Return to the Starting Point

This article describes the development of a mobile robot that can navigate off-line in a given region of space (control point), and return to the starting point. The mobile robot is able to move about in an unfamiliar room, bypass obstacles and remember distance traveled. This robotic system is designed to move indoors within one floor.

Keywords: autonomous mobile robot; the algorithm of movement; return to the starting point; the algorithm to bypass obstacles; navigation; orientation in space

УДК 621.313.32

В. А. Стародубцева, кандидат технических наук, доцент
Д. Г. Аглямов, магистрант
E-mail: hobox@inbox.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Анализ возможности использования электромагнитных муфт в испытательных стендах

Представлен анализ возможности создания нагрузки на валу синхронного двигателя при помощи электромагнитной порошковой муфты.

Ключевые слова: синхронный двигатель; обмотка возбуждения; генератор постоянного тока; асинхронный двигатель; электромагнитная порошковая муфта; муфта скольжения

Обычно на испытательных стендах нагрузка на испытуемый двигатель создается с помощью генератора постоянного тока или асинхронного двигателя в тормозном режиме [1–3]. Оба эти способа имеют свои преимущества и недостатки. Чтобы устранить сложности при использовании этих методов, в настоящей работе рассмотрена возможность создания нагрузки на валу двигателя с помощью электромагнитной муфты.

Существует большое количество конструкции муфт, основанных на различных физических принципах.

В зависимости от связи ведущей и ведомой частей все муфты можно разделить на два класса: муфты с механической связью; индукционные муфты, т. е. со связью через магнитное поле.

Муфты с механической связью использовать в испытательном стенде нельзя, т. к. они не позволяют управлять передаваемым моментом. В связи с этим остановим свое внимание на муфтах с электромагнитным управлением, когда соединение ведущей и ведомой частей происходит не жестко механически, а за счет упругих сил электромагнитного поля.

Электромагнитные муфты подразделяются следующим образом:

1. Фрикционные, или муфты трения, у которых ведущая и ведомая части прижимаются друг к другу электромагнитными силами. Эти муфты выполняются с одним или несколькими дисками, с цилиндрическими или коническими поверхностями трения.

© Стародубцева В. А., Аглямов Д. Г., 2017

2. Порошковые, в которых соединение между частями муфты происходит за счет намагничивания порошковой ферромагнитной смеси, заполняющей зазор между частями муфты.

3. Асинхронные, или муфты скольжения, которые работают за счет сил электромагнитного воздействия, возникающих при вращении ведущей части муфты, имеющей катушку возбуждения, относительно ведомой части (принцип асинхронной машины).

4. Синхронные муфты с постоянными магнитами. Эти муфты имеют магнитопроводы с полюсами на обеих частях муфты. При прохождении тока через катушку возбуждения возникают силы магнитного притяжения между ведущей и ведомой частями (принцип синхронной машины с постоянными магнитами).

5. Гистерезисные муфты, в них связь между ведущей и ведомой частями создается за счет явления гистерезиса при перемагничивании магнитотвердого материала (принцип синхронной гистерезисной машины).

Независимо от принципа действия любая из этих муфт является преобразователем механической мощности на входе в механическую мощность на выходе муфты.

Анализ достоинств и недостатков всех перечисленных выше муфт с точки зрения их использования в испытательных стендах показал, что наиболее подходящей является порошковая электромагнитная муфта: во-первых, позволяет создавать на валу двигателя как движущий, так и тормозной моменты; во-вторых, обеспечивает простоту замера момента, он прямо пропорционален току возбуждения обмотки возбуждения муфты.

Элементарная схема соединения двигателя с рабочим механизмом с помощью электромагнитной порошковой муфты на рисунке. Ее ведущая *1* и ведомая *2* части имеют цилиндрические поверхности; образуемое между ними кольцевое пространство заполняется порошковой смесью (наполнитель) 7. На одной из полумуфт расположена обмотка возбуждения *3*, концы которой выведены на контактные кольца *4*. К обмотке ток подводится при помощи щеток.

Принцип работы электромагнитных муфт состоит в следующем. Если через слой ферромагнитного порошка, заключенного между параллельными поверхностями, пропустить магнитный поток перпендикулярно им, то вследствие трения друг о друга намагниченных частиц порошка возникает сопротивление сдвигу, которое тем сильнее, чем больше намагничен порошок. Частицы порошка начинают перемещаться, причем наиболее интенсивно – в середине слоя, а по направлению к поверхностям интенсивность снижается.

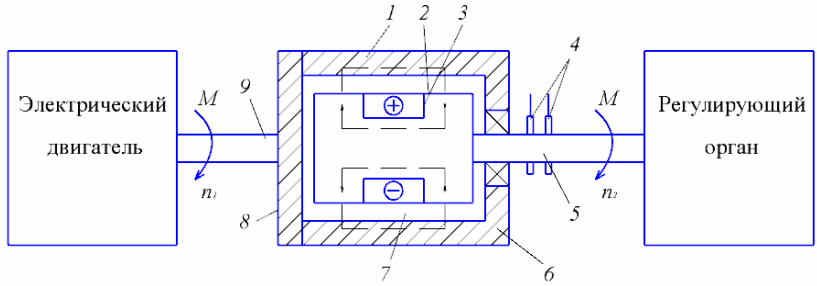


Схема соединения двигателя с рабочим механизмом
с помощью электромагнитной муфты

Основным недостатком порошковых муфт является старение магнитной смеси, слипание зерен магнитной смеси по истечении некоторого периода их работы, проявляющееся в уменьшении ее подвижности. При этом уменьшается передаваемый муфтой момент. Поэтому требуется периодически заменять смесь. Дополнительное затруднение при эксплуатации создается в связи с необходимостью обеспечения в порошковых муфтах надлежащей герметичности и непрерывного наблюдения за ее состоянием.

К числу недостатков исполнительного устройства на базе порошковых муфтах относятся: ухудшение динамических свойств при больших моментах инерции нагрузки, непостоянство характеристик вследствие износа рабочего порошка, тяжелый тепловой режим работы, относительная сложность механического узла.

Вывод

Применение электромагнитных порошковых муфт в испытательных стендах дает возможность создания регулируемого вращательного и тормозного моментов и упрощает замеры этого момента путем измерения тока в обмотке возбуждения муфты за счет их пропорциональности.

Список литературы

1. *Хабенский, М. Я.* Электромагнитные порошковые муфты. – М. : Машиностроение, 1968. – 132 с.

2. *Пуговкин, П. Р.* Электромагнитная порошковая муфта для электропривода : моногр. – Ленинград, 1962. – 27 с.

3. *Жерве, Г. К.* Промышленные испытания электрических машин. – 4-е издание, сокр. и перераб. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 408 с.

Analysis of Possibility of Use of Electromagnetic Clutches in Test Benches

In this article, the analysis of a possibility of creation of loading on a shaft of the synchronous motor by means of an electromagnetic powder sleeve is provided.

Keywords: synchronous motor; field winding,direct current generator; induction motor; electromagnetic powder coupling; slip coupling

УДК 621.313.33

В. А. Стародубцева, кандидат технических наук, профессор
E-mail: starodubceva_v_a@istu.ru
Р. Н. Красноперов, магистрант
E-mail: romakras963@yandex.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашников

Анализ влияния геометрии статора и ротора обращенного асинхронного двигателя на его рабочие характеристики

Выполнен анализ влияния геометрии зубцовой зоны статора и ротора на рабочие характеристики обращенного асинхронного двигателя. Приведены результаты практического расчета одного асинхронного двигателя с выбором оптимальной магнитной цепи.

Ключевые слова: обращенный асинхронный двигатель; магнитная цепь; геометрия зубцовой зоны; магнитная индукция; статор; ротор

Разнообразное применение асинхронных машин для разных условий работы и разных режимов нагрузки влечет за собой особые требования к проектированию с целью создания высокотехнологичных, надежных и экономичных асинхронных двигателей.

Проектирование асинхронных машин связано, в первую очередь, с расчетом геометрии зубцовой зоны статора и ротора, от формы и размеров которых зависят их энергетические характеристики [1].

Целью данной работы является определение влияния геометрии статора и ротора асинхронного двигателя на его рабочие характеристики.

Для проведения анализа выбирается асинхронный двигатель со следующими параметрами (табл. 1). Расчет проводится для стандартной частоты питающей сети – $f = 50$ Гц.

Таблица 1. **Данные для расчета двигателя**

Номинальное напряжение $U_{ном}$, В	Мощность, подводимая к ЭП, кВт	Мощность на валу P_2, кВт	Момент на валу, Н·м	Частота вращения вала, об/мин
122	80	56	1500	350

© Стародубцева В. А., Красноперов Р. Н., 2017

Для обеспечения постоянства индукции по высоте зубцов статора и ротора выбираем такую конфигурацию пазов, при которой зубцы имеют параллельные грани.

Ширина зубца статора находится в обратной зависимости от индукции в этом зубце:

$$b_{Z1} = \frac{B_\delta \cdot t_1 \cdot l_\delta}{B_{Z1} \cdot l_{c1} \cdot k_c}, \quad (1)$$

где B_{Z1} – индукция в зубце статора при постоянном сечении, Тл.

Допустимые значения индукции в зубцах статора колеблются в пределах B_{Z1} = 1,6…1,9 Тл. Анализ проводится при четырех значениях индукций, выбранных через равные промежутки. При подстановке значений индукции от меньшего к большему ширина зубца будет уменьшаться [2]. При этом паз статора в поперечном сечении будет укорачиваться и утолщаться (рис. 1), т. к. площадь его поперечного сечения зависит от диаметра выбранного обмоточного провода, числа эффективных проводников в пазу и числа элементарных проводников в пазу и поэтому остается неизменной:

$$S'_n = \frac{d^2_{\text{и.з}} \cdot u_n \cdot n_{\text{эт}}}{k_з} = \text{const}. \quad (2)$$

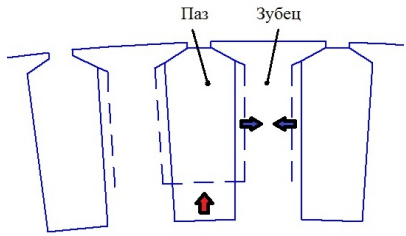


Рис. 1. Наглядное укорочение паза статора в поперечном сечении при изменении индукции в зубце

По полученной площади паза статора и ширине зубца при разных значениях индукции в нем, форма паза для каждого варианта определяется путем построения зубцовой зоны в графическом редакторе КОМПАС-3D (рис. 2) исходя из условия, что зубец имеет параллельные стенки и индукция в зубце не превышает допустимого значения.

Высота зубца h_{Z1} замеряется на модели, полученной в графическом редакторе КОМПАС-3D. Для всех четырех вариантов при анализе влияния геометрии статора выбрана индукция в зубце ротора B_{Z2} = 1,8 Тл, его ширина и высота рассчитана таким же образом, как и ранее у статора.

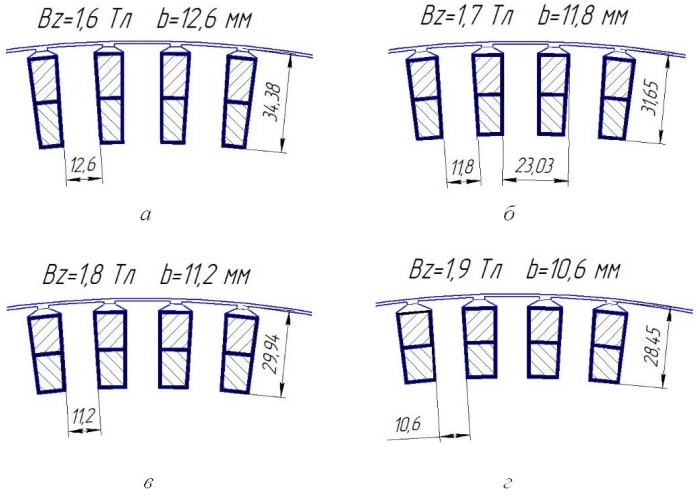


Рис. 2. Зубцовая зона статора обращенного асинхронного двигателя при различных конфигурациях паза: *а* – индукция в зубце B_{z1} = 1,6 Тл; *б* – индукция в зубце B_{z1} = 1,7 Тл; *в* – индукция в зубце B_{z1} = 1,8 Тл; *г* – индукция в зубце B_{z1} = 1,9 Тл;

Результаты анализа влияния геометрии статора обращенного асинхронного двигателя на его рабочие характеристики сведены в табл. 2.

С увеличением индукции в зубцах статора происходит уменьшение основных потерь в стали и как следствие уменьшения суммы всех потерь в двигателе. Также происходит уменьшение тока холостого хода. Коэффициент полезного действия при этом растет, а cosφ остается неизменным [3].

Анализ влияния геометрии ротора начинается с расчета его зубцовой зоны. Ширина зубца ротора находится в обратной зависимости от индукции в этом зубце:

$$b_{Z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot l_{\delta}}{B_{Z2} \cdot l_{c1} \cdot k_c}, \qquad (3)$$

где B_{Z2} – индукция в зубце статора при постоянном сечении, Тл.

Таблица 2. **Результаты анализа влияния геометрии статора обращенного асинхронного двигателя на его рабочие характеристики**

Показатели	Вариант 1.1	Вариант 1.2	Вариант 1.3	Вариант 1.4
Индукция в зубце статора B_{z1}, Тл	1,6	1,7	1,8	1,9
Ширина зубца статора b_{z1}, м	0,0126	0,0118	0,0112	0,0106
Высота зубца статора h_{z1}, м	0,0344	0,0317	0,0300	0,0285
Площадь поперечного сечения паза статора S'_n, м^2	310	310	310	310
Основные потери в стали статора $P_{\text{ст.осн}}$, Вт	530	524	517	504
Сумма всех потерь в двигателе ΣP, Вт	7750	7715	7650	7610
Ток холостого хода в двигателе I_{xx}, А	96	90	87	84
КПД η	0,903	0,904	0,910	0,913
$\cos\varphi_{xx}$	0,0440	0,0435	0,0437	0,0438

Допустимые пределы индукции в зубцах ротора колеблются в пределах B_{Z2} = 1,75…2,0 Тл.

При выборе короткозамкнутого ротора используются литые роторные обмотки, и для обеспечения высоких энергетических показателей номинального режима следует ориентироваться на грушевидные пазы ротора [4].

Площадь поперечного сечения стержня в грушевидном пазу ротора находится в прямой зависимости от значения тока в обмотке ротора:

$$q_c = \frac{I_2}{J_2}, \tag{4}$$

где J_2 – плотность тока в стержнях ротора.

Плотность тока в стержнях ротора машин закрытого обдуваемого исполнения при заливке пазов алюминием выбирается в пределах J_2 = = 2,5…3,5·10^6 А/м^2, причем для машин большей мощности берется меньшее значение.

По полученной площади паза ротора и ширине зубца при разных значениях индукции в нем форма паза для каждого варианта определяется путем построения зубцовой зоны в графическом редакторе КОМПАС-3D исходя из условия, что зубец имеет параллельные стенки и индукция в зубце не превышает допустимого значения [5]. Высота зубца h_{Z2} замеряется на модели, полученной в графическом редакторе

КОМПАС-3D (рис. 3). Для всех четырех вариантов при анализе влияния геометрии статора выбрана индукция в зубце статора B_{Z1} = 1,8 Тл.

Результаты анализа влияния геометрии ротора обращенного асинхронного двигателя на его рабочие характеристики сведены в табл. 3.

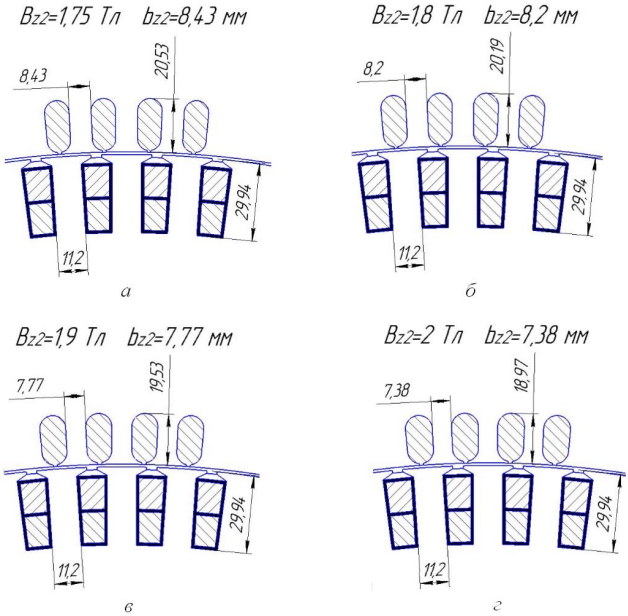


Рис. 3. Зубцовая зона ротора обращенного асинхронного двигателя при различных конфигурациях паза: *а* – индукция в зубце B_{z2} = 1,75 Тл; *б* – индукция в зубце B_{z2} = 1,8 Тл; *в* – индукция в зубце B_{z2} = 1,9 Тл; *г* – индукция в зубце B_{z2} = 2,0 Тл

Таблица 3. **Результаты анализа влияния геометрии ротора обращенного асинхронного двигателя на его рабочие характеристики**

Показатель	Вариант 2.1	Вариант 2.2	Вариант 2.3	Вариант 2.4
Индукция в зубце ротора B_{z2}, Тл	1,75	1,8	1,9	2,0
Ширина зубца ротора b_{z2}, м	0,0084	0,0082	0,0078	0,0074
Высота зубца ротора h_{z1}, м	0,0205	0,0202	0,0195	0,0190
Площадь поперечного сечения паза ротора S'_n, м^2	165	165	165	165
Пульсационные потери в зубцах ротора $P_{пул2}$, Вт	20	22	25	27

Окончание табл. 3

Показатель	Вариант 2.1	Вариант 2.2	Вариант 2.3	Вариант 2.4
Электрические потери во всех фазах обмотки ротора $P_{Э2}$, Вт	1735	1729	1725	1720
Сумма всех потерь в двигателе ΣP, Вт	7697	7693	7692	7689
Ток холостого хода в двигателе $I_{хх}$, А	92,0	89,0	87,9	85,0
КПД η	0,9035	0,9036	0,9038	0,9039
cos $\varphi_{хх}$	0,0418	0,0433	0,0439	0,0454

С увеличением индукции в зубцах ротора пульсационные потери также возрастают, электрические потери во всех фазах обмотки уменьшаются, в результате сумма всех потерь в двигателе снижается [6]. Также происходит уменьшение тока холостого хода. Коэффициент полезного действия и cosφ при этом остаются неизменными.

Вывод

Путем подбора геометрии зубцовой зоны статора и ротора можно получить наилучшие показатели рабочих характеристик двигателя.

Список литературы

1. *Стародубцева*, *В. А.* Расчет и проектирование электрических машин. Асинхронные машины : учеб. пособие для вузов. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2005. – 352 с.

2. *Вольдек*, *А. И.* Электрические машины: машины переменного тока / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2010. – 300 с.

3. *Красноперов*, *Р. Н.* Анализ рабочих характеристик стандартного и обращенного асинхронного двигателя / Р. Н. Красноперов, В. А. Стародубцева // Приборостроение в XXI веке – 2015. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XI Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 25–27 нояб. 2015 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. – С. 273–277.

4. *Красноперов*, *Р. Н.* Анализ связи между конструкцией обмотки и площадью паза обратимого асинхронного двигателя / Р. Н. Красноперов, В. А. Стародубцева // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сб. мат. III Всерос. науч.-техн. конф. асп., магистр. и молодых ученых с междунар. участием (22–23 апр. 2015 г.). – Ижевск, 2015. – С. 52–57.

5. *Радин*, *В. И.* Электрические машины: Асинхронные машины : учеб. пособие для вузов / В. И. Радин, Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович ; под ред. И. П. Копылова. – М. : Высш. шк., 1988. – 328 с.

6. *Алиев*, *И. И.* Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах. – М. : ИП Радиософт, 2008. – 128 с.

Analysis of Influence of Stator and Rotor Geometry on the Operating Characteristics of Inverted Induction Motor

In this article, the influence of the geometry of the tooth of the stator and rotor zones on the operating characteristics of the inverted induction motor is analyzed. The results of the practical calculation of the induction motor with a choice of an optimum magnetic circuit are presented.

Keywords: the inverted induction motor; the magnetic circuit; the geometry of the tooth zone; the magnetic induction; a stator; a rotor

УДК 621.311.25

В. А. Стародубцева, кандидат технических наук, доцент
А. С. Мазитов, студент
E-mail: sudar.s@mail.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Альтернативная энергия. Солнечные батареи

С увеличением потребления электрической энергии человеком становится актуальной проблема дешевизны электрической энергии и ее неисчерпаемости. Решение этой проблемы все чаще предлагает отрасль альтернативной энергии. Одним из способов получения простой, а, следовательно, и дешевой электроэнергии является использование солнечных батарей, преобразующих энергию, полученную днем от Солнца, в световую ночью.

С ростом интенсивности передвижения людей по земному шару, в частности дальние поездки в другие города, путешествия и т. д. возникает потребность в освещении дорог, магистралей, площадок для отдыха порой в очень сложных местах для проведения обычной электрической сети, что существенно увеличивает стоимость потребления и обеспечения электроэнергией труднодоступных районов.

Уличное освещение на солнечных батареях устанавливают автономно на частных участках, автомагистралях, городских улицах. Его имеет смысл применять в трудно- или недоступных для подвода электроэнергии местах. Осветительные приборы также можно использовать для освещения местности или декоративной подсветки.

Ключевые слова: солнечные батареи; альтернативная энергия; автономное освещение; энергия будущего; солнечная энергия

Основная задача солнечных батарей

Основная задача освещения солнечными батареями заключается в получении общей доступной энергии, ее дешевизне и неисчерпаемости источника энергии – Солнца [1–4].

Достоинства и недостатки солнечных батарей

Достоинства:

1) использование в удаленных и труднодоступных местах, где для подвода сетевой электрической энергии требуется большие затраты;

2) работа в автономном режиме;

3) световой поток светодиодов дает рассеянный и приятный для глаза человека свет;

© Стародубцева В. А., Мазитов А. С., 2017

4) экологичность установок и получаемой электроэнергии.

Недостатки:

1) в ветреных регионах с большим количеством пыли в воздухе происходит быстрое загрязнение защитного стекла солнечной батареи, что снижает работоспособность прибора;

2) для правильного поглощения энергии солнечными батареями в жарких климатических условиях необходимо использовать систему охлаждения;

3) отрицательные температуры приводят к сбоям в работе аккумулятора; сильная и длительная жара приведет к перегреву полупроводников и выходу их из строя;

4) в регионах с короткими солнечными днями будет происходить не полный заряд аккумуляторов, это существенно снизит время работы светильников в ночное время.

Устройство и принцип работы солнечных батарей

Работают уличные светильники благодаря накопленному аккумулятором заряду от солнечной батареи. Солнечного дня достаточно для накопления энергии, позволяющей обеспечить бесперебойную работу освещения до 10 часов. В пасмурный день заряд аккумулятора будет происходить от дневного света, но время беспрерывной работы светильников уменьшится в несколько раз. Лампа осветительного прибора автоматически включается от фотоэлемента, реагирующего на естественное уличное освещение. После отключения светильника в дневное время аккумулятор переходит в режим накопления энергии. На всех моделях светильников имеются выключатели, и при необходимости их можно отключать вручную. Экономные лампочки светильников выполнены из блоков, включающих несколько светодиодов. Маленькие декоративные модели в основном оборудованы одним светодиодом средней мощностью 0,06 Вт, в сумме выдаваемая мощность осветительной установкой примерно равняется 300 Вт.

Автономное освещение на солнечных батареях улиц и дорог устроено иначе. В основном это высокие столбы с закрепленными на них светодиодными светильниками и фотомодулями. Устанавливают опоры методом заглубления в грунт, закреплением на твердом покрытии.

В систему освещения входят:

1) светильник, работающий на светодиодах;

2) несколько солнечных батарей;

3) контроллер, предназначенный для анализа освещения, в зависимости от ситуации включает/выключает светодиоды;

4) аккумулятор для подачи электричества на светодиоды и последующее его накопление от солнечной батареи;

5) корпус для аккумулятора и контроллера;

6) крепления для фотомодулей.

Установленные датчики освещенности дают команду контроллеру для включения света в темное время суток и выключения его днем. Автоматическая работа системы позволяет рационально использовать энергию аккумулятора. При избытке вырабатываемой электроэнергии ее направляют для электроснабжения светофора или установленного рядом киоска.

Подсветка пешеходных переходов

Ограничение видимости на дорогах в осенне-зимний период, когда продолжительность дня уменьшается, создает опасность на пешеходных переходах. Устранить проблему помогает подсветка на солнечных батареях. Установленный на системе датчик движения реагирует при появлении человека на пешеходном переходе и отсчитывает время, требуемое для пересечения дороги. Силуэт пешехода освещает белый свет, который дает понять водителю о необходимости убавить скорость автомобиля. Дополнительным предупреждением для водителя о затемненном пешеходном переходе служит светофор, работающий от солнечных батарей. Мигая в темноте желтым цветом, светофор обращает внимание водителя на возможное появление пешехода на дороге.

Автономные электростанции

При необходимости увеличения мощности светильников их можно объединять в единую энергосистему, собирая, таким образом, небольшие автономные солнечные электростанции. Установки можно использовать для освещения небольших населенных пунктов, также они удобны для накопления и хранения электроэнергии за пределами населенных пунктов.

Выводы

Использование солнечной энергии для качественного уличного освещения не требует больших затрат. Все расходы со временем окупятся за счет экономии электроэнергии.

Наиболее эффективно уличное освещение будет работать в регионах с максимальным количеством солнечных дней и умеренным климатом.

Список литературы

1. Солнечная энергетика : учеб. пособие для вузов / под ред. В. И. Виссарионова. – М. : Изд-во МЭИ, 2008. – 80 с.

2. *Умаров*, *Г. Я.* Солнечная энергетика / Г. Я. Умаров, А. А. Ершов. – М. : Знание, 1974. – 50 с.

3. *Харченко*, *Н. В*. Индивидуальные солнечные установки. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 52 с.

4. Солнечная энергетика // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Солнечная_энергетика (дата обращения: 12.11.2016).

Alternative energy. Solar panels

The analysis of alternative solar energy and its potential use is conducted. The advantages and disadvantages of using solar power for street lighting are described.

Keywords: solar panels; alternative energy; Autonomous lighting; future energy; solar energy

УДК 621.311.25

М. В. Тюлькин, старший преподаватель
И. А. Мельников, магистрант
E-mail: mely1551994@gmail.com
И. В. Штенников, кандидат технических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Разработка устройства на микроконтроллерах для приема-передачи данных по инфракрасному каналу

Разработано устройство на программируемых микроконтроллерах для приема-передачи данных по ИК-каналу. Составлены программы для микроконтроллеров. Создан прототип устройства.

Ключевые слова: ИК (инфракрасный); ИК-канал; датчик температуры; микроконтроллер

С развитием техники возникает необходимость в измерении физических параметров (температуры, давления и т. д.) движущихся объектов внутри сложного механизма для отслеживания их состояния, предотвращения аварийных ситуаций и т. д. Поскольку контролируемый объект может находиться в движении или в труднодоступном месте, то для связи с ним необходим беспроводной способ передачи-приема данных.

Примером тела, для которого возникает необходимость контроля температуры поверхности, является поршень двигателя внутреннего сгорания [1]. Датчик температуры, устройство обработки и передачи исходных данных монтируются в поршень, а устройство приема размещается в картере. Пример расположения данного устройства приведен на рис. 1.

Передачу информации о температуре с датчика на приемник в данном случае наиболее рационально осуществлять по оптическому каналу или радиоканалу. Формирование информационного сигнала, его обработку, прием-передачу осуществляют с помощью программируемых микроконтроллеров. Структурная схема прототипа устройства передачи-приема данных по ИК каналу приведена на рис. 2.

В устройстве для передачи данных по ИК-каналу использован ИК-излучатель *3* – диод TSAL5100, с длиной волны 950 нм и ИК-приемник *4* – TSOP 4836, с частотой 36 кГц. В передатчике информационно-

© Тюлькин М. В., Мельников И. А., Штенников И. В., 2017

го сигнала использован микроконтроллер *2* – ATtiny2313, который управляет излучателем *3*. Приемник включает микроконтроллер *5* – ATmega 8, который обрабатывает полученные данные и выводит значение температуры на устройство вывода *6* – LCD-дисплей.

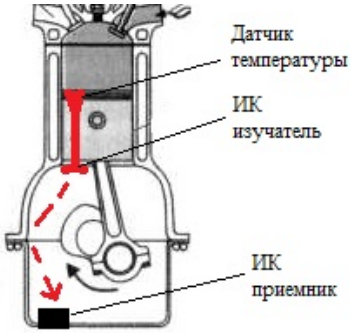


Рис. 1. Расположение устройства приема-передачи данных по ИК-каналу

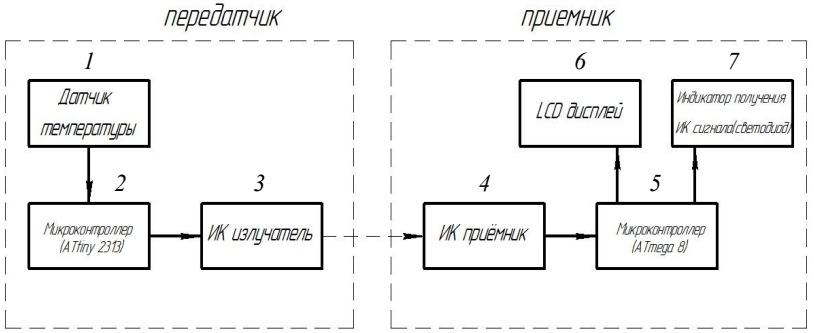


Рис. 2. Структурная схема прототипа устройства приема-передачи данных по ИК-каналу

Принципиальная электрическая схема прототипа устройства приеме-передачи данных по ИК-каналу приведена на рис. 3. В передатчике данного устройства использован высокочастотный транзистор 2SA1020, коллектор которого подключен через ИК-диод, токоограничивающий резистор к порту D1/TXD(transmitter) микроконтроллера ATtiny2313. Для ИК-приемника настройкой нулевого таймера на выходе PB.2 микроконтроллера ATtiny2313 формируют последовательность импульсов частотой 36 кГц, которые поступают на базу транзи-

стора VT1. В качестве датчика температуры в прототипе устройства передачи-приема данных по ИК-каналу использован цифровой датчик температуры – ds18b20 с диапазоном измерения температуры от –55 до +125 °С.

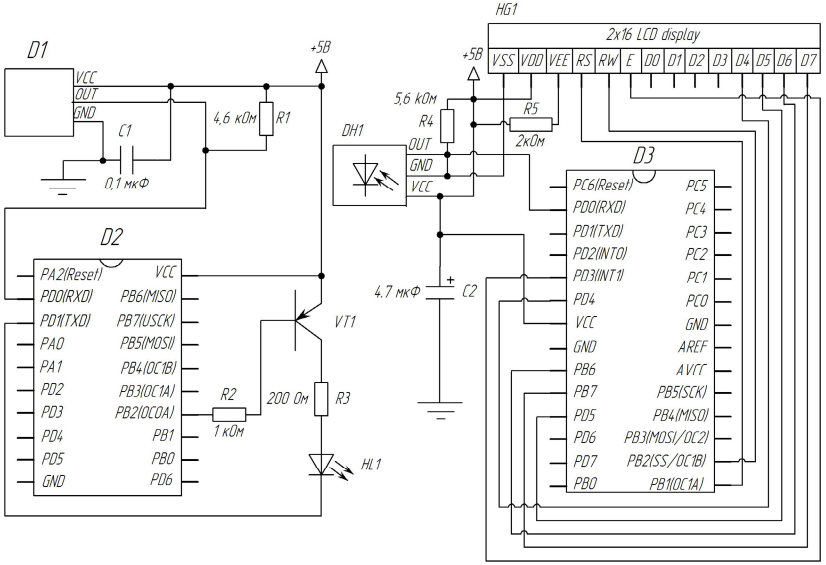


Рис. 3. Принципиальная схема прототипа устройства приема-передачи данных по ИК-каналу

Важнейшим компонентом данного устройства является приемник ИК-излучения. Приемники, как фототранзисторы и фотодиоды, не подходят в полной мере для этих целей, т. к. подвержены засветке от сторонних источников энергии, что может привести к ложному срабатыванию. К тому же они имеют малый угол приема сигнала. В связи с этим в данном устройстве использован приемник – типа TSOP4836 [2], который реагирует только на импульсное излучение частотой 36 кГц и отфильтровывает остальное излучение.

Внутри корпуса приемника находится интегральная микросхема, которая регулирует уровень принимаемого сигнала, усиливает и производит его демодуляцию.

Основные требования, предъявляемые к передатчику [2]:

– минимальное количество импульсов в пакете - 15,

– максимальное количество импульсов в пакете - 50,

– минимальное время между пакетами - 15T (период основной частоты), где $T=0{,}0278 \cdot 10^{-3}$ с,

– частота импульсов излучателя равна основной частоте ИК приемника – 36 кГц,

– светодиод с длиной волны излучения 950 нм.

При соблюдении данных требований дальность приема-передачи цифровых сигналов в канале прямой видимости между ИК-диодом и ИК-приемником может достигать 10–20 метров. Скорость передачи составляет около 1200 бит в секунду [2], что соответствует 150 числовым значениям температуры.

Программирование микроконтроллеров производилось на языке «С» [3] в программной среде *CodeVision AVR*.

При выполнении работы разработан прототип устройства на микроконтроллерах для приема-передачи данных по инфракрасному каналу. Составлена программа, проведено программирование микроконтроллеров. В прототипе реализована передача и прием данных по ИК-каналу, вывод информации о температуре на дисплей.

Список литературы

1. Температура поршня // Engine Power, Россия. – URL: http://enginepower.pro/blogi/45-temperatura-porshnya.html (дата обращения: 14.10.2016).

2. Всё об ИК-приемнике «TSOP»» // http://myrobot.ru Россия. – URL: http://myrobot.ru/wiki/index.php?n=Components.TSOP (дата обращения: 14.10.2016).

3. *Прокопенко*, *В. С*. Программирование микроконтроллеров ATMEL на языке С. – М. : Додэка XXI, 2012. – 320 с.

Development of the Device Based on Microcontroller for Transmitting and Receiving Data via Infrared Channel

The device with programmable microcontrollers is developed for transmitting and receiving data by infrared channel. The prototype is created. Programs for microcontrollers are written.

Keywords: Infrared; infrared channel; microcontroller; temperature sensor

УДК 621.371

Н. Т. Хакимов, кандидат технических наук, старший преподаватель
Р. И. Комарский, курсант
E-mail: raf.niz@yandex.ru
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж

Конструирование универсального цифрового измерителя частоты «Омега-1000»

Приводится анализ работы по конструированию и исследованию возможностей применения цифрового частотомера. Приводятся его сравнительный анализ с известными аналогами и определяются направления его дальнейшего совершенствования.

Ключевые слова: частота; электромагнитная волна; радиосвязь; радиоподавление; схема электрическая принципиальная; микроконтроллер

Введение

В настоящее время без практического применения принципов беспроводной передачи информации на расстоянии не обходится ни одна отрасль науки и техники. Такие технические достижения, как сотовая связь, беспроводной WI-FI-интернет, различные устройства на дистанционном управлении прочно вошли в нашу жизнь. Кроме того, в Вооруженных силах РФ одним из видов боевого обеспечения является радиоэлектронная борьба (РЭБ), которая включает радиоэлектронную разведку (РЭР), радиоэлектронное подавление (РЭП) и радиоэлектронную защиту (РЭЗ) [1]. Данные мероприятия требуют технический анализ сигналов и передачу информации на большие расстояния, что невозможно без точного знания диапазона рабочих частот. Проводя анализ радиотехнических цепей и сигналов, необходимо знать точные значения несущих и модулирующих частот [2]. Радиолюбителю без точного знания частоты невозможно сконструировать и наладить устройства, включающие приемопередающие узлы.

Носителями информации во всех этих случаях являются радиоволны. Радиоволны – это электромагнитные колебания с частотой и длиной волны в диапазонах 3 кГц – 3000 ГГц и 0,1 мм – 100 км соответственно [3]. Измерение частоты осуществляется специальными

© Хакимов Н. Т., Комарский Р. И., 2017

радиоэлектронными устройствами – измерителями частоты (частотомерами). Данные приборы должны обеспечивать точные измерения частот электромагнитных колебаний в заданном диапазоне частот и, кроме того, обладать массогабаритными характеристиками, обеспечивающими эффективное использование частотомера как отдельного прибора, так и в составе комплекса РЭБ. Немаловажным требованием является его небольшая себестоимость, которая сделает прибор доступным и простым для радиолюбителей.

Для решения данных задач был сконструирован универсальный цифровой измеритель частоты «Омега-1000»

Цель и порядок работы

Цели: конструирование цифрового частотомера, не уступающего заводским аналогам; поиск направлений его дальнейшего совершенствования; рассмотрение возможностей применения собранного прибора в радиолюбительской практике, комплексах РЭБ при проведении учебных занятий.

В ходе работы проведен анализ схем имеющихся частотомеров, оценены их возможности, определены их слабые и сильные стороны.

Из имеющихся типовых схем измерителей частоты выбрана наиболее удовлетворяющая заявленным требованиям, на основе которой собрана рабочая схема частотомера. Далее проведена наладка и калибровка прибора, проведены измерения частоты при осуществлении радиосвязи по портативным радиостанциям. При этом правильность результатов замеров контролировалась использованием заводских аналогов.

Базой для выполнения работы послужила кафедра радиоэлектроники ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж). Кафедра оснащена специализированными лабораториями и комплектом научного оборудования, в состав которого входят цифровые измерительные приборы, персональные компьютеры, специальные программы для моделирования узлов радиоэлектронной аппаратуры.

Изготовление прибора

В ходе выполнения работы использовался экспериментальный метод, включающий в себя сборку электрической схемы, ее наладку, калибровку и непосредственно измерение (рис. 1).

Для конструирования была выбрана схема, включающая в себя доступные радиодетали, в частности, микроконтроллер PIC16F84A, позволяющий использовать программирование для управления различными узлами радиоэлектронной аппаратуры.

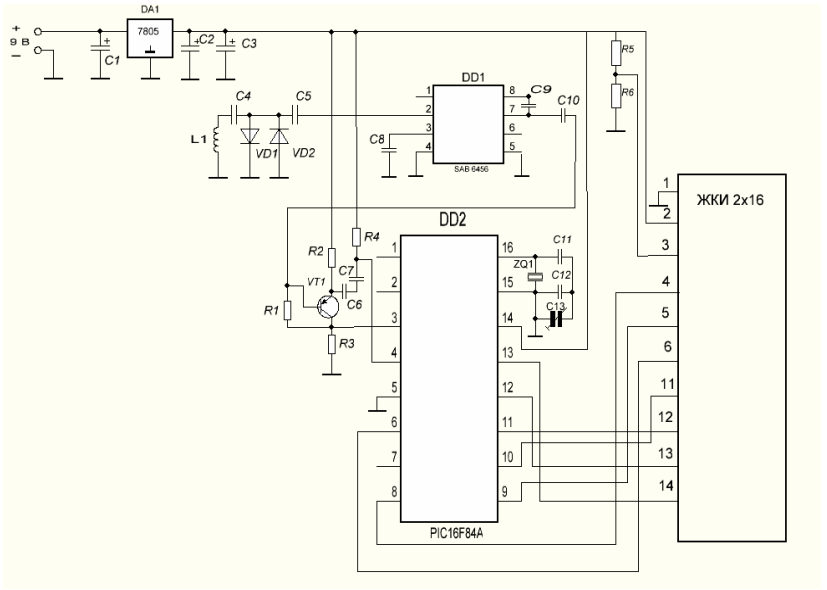


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная цифрового частотомера

Основные узлы схемы

1) Стабилизатор напряжения 5 В, выполненный на трехвыводном интегральном стабилизаторе 78L05 и конденсаторах С3, С4, С5. Конденсатор С3 на входе необходим для ликвидации ВЧ-помех при подаче входного напряжения, а конденсаторы С4, С5 на выходе стабилизатора обеспечивают стабильность питания при резком изменении тока нагрузки и уменьшают степень пульсаций.

2) Последовательный колебательный контур, являющийся простейшей резонансной (колебательной) цепью. Состоит из последовательно включенных катушки индуктивности L1 и конденсатора С1, служит для обнаружения электромагнитных колебаний в заданном диапазоне частот и передаче их в последующие каскады.

3) Делитель СВЧ, основу которого составляет микросхема SAB6456 и конденсаторы С1, С2, С12, а также диоды VD1, VD2. Частотомер, собранный на одном лишь микроконтроллере, сможет измерить частоту в пределах лишь до 50 МГц. Данный узел служит для расширения диапазона измеряемых частот путем деления частоты входного колебания на заданный коэффициент деления и формирования на выходе импульсной последовательности с частотой, значитель-

но меньшей, чем частота следования входных импульсов. Эта операция позволяет микроконтроллеру осуществить анализ входного колебания и после умножения частоты на соответствующий коэффициент определить и вывести на жидкокристаллический индикатор конечное значение зафиксированной частоты.

4) Резистивный усилитель на биполярном транзисторе с общим эмиттером, включающий в себя также резисторы R1, R3, R6, R7 и конденсаторы C6, C11. Данный усилительный каскад предназначен для усиления сигнала на выходе делителя СВЧ для дальнейшего его анализа.

5) Кварцевый резонатор ZQ1, предназначенный для стабилизации частоты опорного генератора. Конденсатором C9 подстраивается в небольших пределах частота генерации по принципу: чем меньше емкость, тем выше частота.

6) Микроконтроллер PIC16F84A, выполняющий роль «головного мозга» устройства. Принимает усиленные предыдущим каскадом импульсы, считает их и преобразует в 10-разрядные десятичные числа.

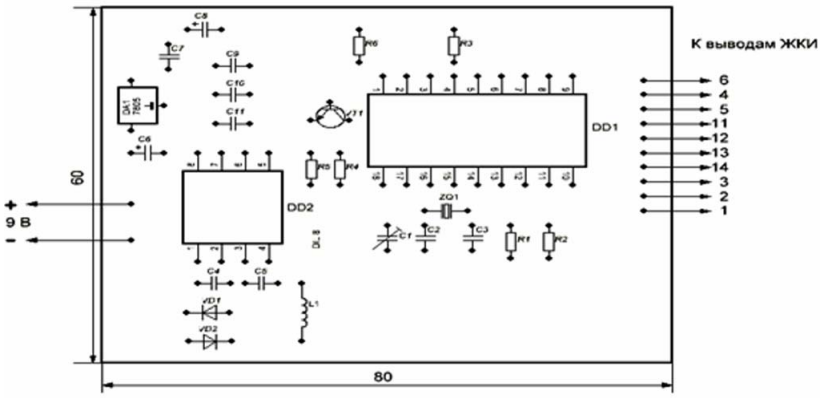
7) Жидкокристаллический индикатор (ЖКИ) WH0802-YGH-CT – отображает информацию о частоте обнаруженной электромагнитной волны.

При изготовлении печатной платы использовался метод моделирования. В компьютерной программе Sprint Layout 5.0 была изготовлена модель печатной платы, на ней спланировано размещение радиодеталей. Эскизы сборочного чертежа и печатной платы и представлены на рис. 2

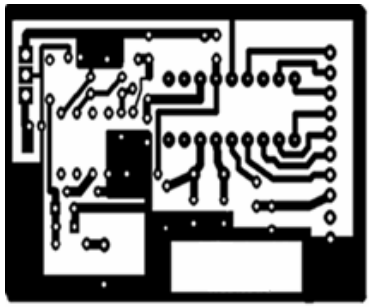
У сконструированного цифрового измерителя частоты «Омега-1000» (рис. 3) есть известные заводские аналоги. К ним относятся портативный частотомер АКТАКОМ АСН-2801 и цифровой частотомер АСН-832х.

Технические характеристики АКТАКОМ АСН-2801

Диапазон измеряемых частот	30 МГц – 2,8 ГГц
Разрешающая способность	1 кГц
Чувствительность на частоте	100 МГц 5 мВ
Время измерения	0,0625 с
Разрядность ЖКИ индикатора	7 разрядов
Входной импеданс	50 Ом
Габаритные размеры	80×68×31 мм
Масса	210 г



а



б

Рис. 2. Эскизы: сборочного чертежа платы (*а*); печатной платы (*б*)

Рис. 3. Сконструированный цифровой измеритель частоты «Омега-1000»

Технические параметры АСН-832х

Диапазон входных частот по каналам А и В	0,1 Гц – 200 МГц
Диапазон входных частот по каналу С	200 МГц – 8 ГГц
Чувствительность по входу А, В	25 мВ
Разрядность ЖКИ индикатора	10 разрядов
Входной импеданс по каналам А, В, С	50 Ом
Время измерения	1сек
Габаритные размеры	260×210×70 мм
Масса	не более 1,5 кг

Технические параметры «Омега-1000»

Диапазон измерения частоты	30 МГц – 1 ГГц
Точнось измерений	1 Гц
Питание	9 В
Время непрерывной работы	20 ч
Габариты	133×22×68 мм
Масса	450 г

С использованием сконструированного прибора была исследована зависимость качества радиосвязи от частоты радиосвязи в городских условиях.

Эксперимент проводился в городских условиях с применением измерителя частоты «Омега-1000» и двух пар маломощных портативных радиостанций Midland GXT-400 и Midland-Alan-42. Он заключался в следующем.

По одной радиостанции каждого типа были установлены в городском парке и на спортивном стадионе. Расстояние между объектами 2 км, между ними находились различные препятствия в виде деревьев, зданий и других различных сооружений. По обеим рациям одновременно осуществлялась связь, во время которой с помощью частотомера была зафиксирована частота. Согласно показаниям прибора связь по радиостанциям Midland GXT-400 была на частоте 433,075 МГц, по радиостанциям Midland-Alan-42 – 30,105 МГц. Зафиксированные прибором частоты были сверены с частотами, указанными в инструкциях по применению радиостанций. Отклонения были незначительные и не превысили несколько десятков герц, что позволило сделать вывод об исправности прибора и достоверности его показаний.

Однако в ходе эксперимента наблюдалось ухудшение качества связи на частоте 433,075 МГц в виде шумов в динамике и неразборчивой речи. В это же время на частоте 30,105 МГц никаких помех не наблю-

далось. Эксперимент проводился 5 раз, конечный результат не изменился.

Учитывая факт, что длина электромагнитной волны обратно пропорциональна ее частоте, можно судить о следующем. Радиоволны, излучаемые радиостанцией Midland-Alan-42, имеют длину волны больше, чем Midland GXT-400. Следовательно, распространяясь в пространстве, они огибают более габаритные препятствия, чем сигналы радиостанции Midland GXT-400. Иными словами, в той местности, где много препятствий, связь будет лучше осуществляться по тем радиостанциям, у которых рабочая частота меньше. Это обусловлено тем, что для электромагнитных волн характерно явление дифракции.

Перспективы

В дальнейшем возможно применение данного прибора в радиолюбительской практике и в ходе проведения учебных занятий для наглядной демонстрации принципа действия частотомера. Также рассматривается модернизация прибора для более эффективного его применения в составе комплексов РЭБ. Кроме того, возможно применение данного устройства в качестве сигнализатора о наличии устройств несанкционированного съема информации.

Усовершенствование прибора

– планируется установка разъемов, с помощью которых возможно измерение частоты модулирующего напряжения;

– доработка программы микроконтроллера PIC16F84A, добавление функции памяти, секундомера;

– замена радиодеталей аналогами с целью улучшения характеристик прибора;

– планируется разработка устройств, позволяющих «прослушивать» зафиксированную частоту и имитатора устройства несанкционированного съема информации.

Выводы

Конструирование универсального цифрового измерителя частоты и исследование его характеристик выполнено успешно. Расчет себестоимости показал разницу в денежных затратах при конструировании прибора собственноручно (1170 руб.) и при покупке заводского (12 364 руб.).

Сконструированный прибор по точности измерений не уступает заводским аналогам.

В ходе успешного выполнения работы автором был получен рабочий экспериментальный образец, позволяющий провести ряд исследо-

ваний характеристик и принципов работы прибора. Это открывает широкие возможности модернизации данного устройства.

Проведенный эксперимент показал, что для осуществления радиосвязи в городе (например, в такси) целесообразно применение радиостанций метрового УКВ-диапазона.

Список литературы

1. *Палий*, *А. И.* Радиоэлектронная борьба. – М. : Воениздат, 1989. – 350 с.

2. *Никулин*, *С. А.* Энциклопедия начинающего радиолюбителя / С. А. Никулин, А. В. Повный. – СПб. : Наука и Техника, 2011 – 380 с.

Designing of Universal Digital Frequency Meter ”Omega 1000“

The analysis of the work on the design and study of possibilities of application of digital frequency. We give it a comparative analysis with known counterparts and determined the direction of its further improvement.

Keywords: frequency; electromagnetic wave; radio communication; electric concept scheme; microcontroller

УДК 621.375.41

И. В. Штенников, кандидат технических наук, доцент
E-mail: igorst58@mail.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Методика определения электрической прочности жидкой изоленты

Предложена методика приготовления образцов и определения электрической прочности вновь разрабатываемых полимеризующихся, затвердевающих жидких диэлектриков. Проведено ее экспериментальное опробование при исследовании жидкой изоленты Nano 4 Premium.

Ключевые слова: электрическая прочность; диэлектрик; образцы; испытания

В производстве электротехнических изделий широко используются различные пропиточные лаки, заливочные массы и др. подобные материалы, которые после их сушки и затвердевания способствуют повышению электрической прочности подобного рода изделий [1].

Определение электрической прочности таких материалов: методика приготовления образцов, их форма, размеры и т. д., а также материалы сопутствующие изготовлению образцов регламентированы ГОСТ 6433.3–71 и техническими условиями на испытуемый материал диэлектрика [2].

При разработке новых электроизоляционных материалов порой еще не известны и не сформулированы технические условия на материалы, сопутствующие изготовлению образцов из испытуемого диэлектрика, а оценку его электроизоляционных свойств необходимо провести.

В связи с этим разработана методика приготовления образцов для определения электрической прочности плоских образцов из вновь разрабатываемых полимеризующихся, затвердевающих жидких диэлектриков в направлении, перпендикулярном поверхности образца.

Приготовление образцов производится на горизонтальной, гладкой, твердой поверхности. Испытуемый диэлектрик в жидком состоянии помещается между слоями известного листового твердого диэлектрика. По периметру между слоями диэлектрика предварительно размещаются полоски из этого же листового материала. Сверху образца ус-

© Штенников И. В., 2017

танавливается груз – плоская металлическая пластина, обеспечивающая равномерное распределение жидкого диэлектрика между слоями листового диэлектрика и удаление излишек жидкого диэлектрика через предусмотренные отверстия между полосками листового диэлектрика, расположенными по периметру образца. Под действием груза образец выдерживается при комнатной температуре 18–22 °С до полного затвердевания, полимеризации жидкого диэлектрика.

Такая методика обеспечивает получение плоских слоистых образцов с испытуемым диэлектриком в середине равномерной толщины по его площади после полимеризации, затвердевания. При этом сохраняется целостность испытуемого диэлектрика, отсутствуют механические дефекты: деформация, трещины и т. п. после его приготовления для испытаний на электрическую прочность.

Данная методика экспериментально опробована при определении электрической прочности разрабатываемой жидкой изоленты *Nano 4 Premium*.

Для приготовления образцов в качестве листовых диэлектриков использовались: электрокартон и пленкоэлектрокартон толщиной 0,11 и 0,23 мм и электрической прочностью 18 и 32 кВ/мм соответственно. Из этих же материалов вырезались полоски для размещения по периметру образцов между слоями листовых диэлектриков. Форма и размеры образцов для определения электрической прочности жидкой изоленты *Nano 4 Premium* приведены на рис. 1 и 2.

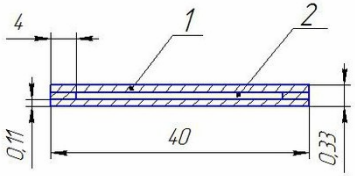


Рис. 1. Образец для определения электрической прочности жидкой изолентой *Nano 4 Premium* с электрокартоном: *1* – электрокартон; *2* – жидкая изолента *Nano 4 Premium*

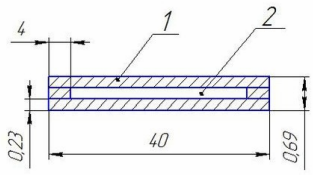


Рис. 2. Образец для определения электрической прочности жидкой изолентой *Nano 4 Premium* с пленкоэлектрокартоном: *1* – пленкоэлектрокартон; *2* – жидкая изолента *Nano 4 Premium*

После полимеризации жидкой изоленты у полученных образцов измерялась толщина. Затем каждый образец по одному помещался в измерительную ячейку (рис. 3) между подпружиненными цилиндрическими электродами, которая устанавливалась в высоковольтный аппарат АИИ-70 для определения пробивного напряжения.

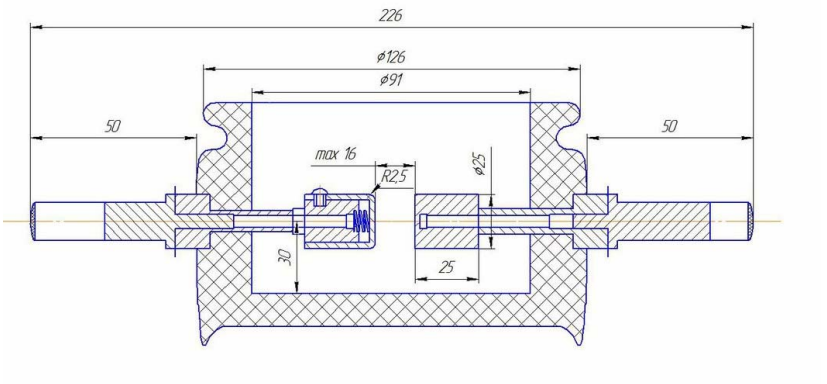


Рис. 3. Измерительная ячейка

Результаты испытаний электрической прочности электрокартона и пленкоэлектрокартона приведены в табл. 1.

Таблица 1. **Электрическая прочность электрокартона и пленкоэлектрокартона**

№ п/п	Материал диэлектрика	№ образца	Результаты измерений			
			толщина образца, мм	$U_{пр}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм	$E_{пр.ср}$, кВ/мм
1	Электрокартон	1	0,11	2	18	18
		2	0,11	2	18	
2	Пленкоэлектрокартон	1	0,23	8	35	35
		2	0,23	6	26	
		3	0,23	8	35	

Результаты испытаний электрической прочности образцов жидкой изолентой *Nano 4 Premium* с электрокартоном и пленкоэлектрокартоном с временем полимеризации 24 часа представлены в табл. 2.

После проведения эксперимента данные образцы расслоили и обнаружили, что жидкая изолента полимеризовалась не окончательно, наблюдались фрагменты ее вязкотекучего состояния. В связи с этим для следующей партии образцов с жидкой изолентой время полимеризации (выдержки) было увеличено до 96 часов. Результаты испытаний этих образцов приведены в табл. 3.

Из результатов проведенных исследований видно, что для образцов с жидкой изолентой *Nano 4 Premium* их электрическая прочность не превышает прочности однослойных электрокартона и пленкоэлектро-

картона. В случае образцов жидкой изоленты с электрокартоном электрическая прочность в 2,5 раза меньше, чем для однослойного электрокартона, а для жидкой изолентой с пленкоэлектрокартон, электрическая прочность в 1,7–1,9 раз меньше по сравнению с однослойным пленкоэлектрокартоном.

Таблица 2. **Электрическая прочность жидкой изоленты *Nano 4 Premium* (время полимеризации – 24 часа)**

№ п/п	Материал диэлектрика	Результаты измерений			
		толщина образца, мм	$U_{пр}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм	$E_{пр.ср.}$, кВ/мм
1	*Nano 4 Premium* с электрокартоном	0,385	3	7,8	7,15
2	*Nano 4 Premium* с электрокартоном	0,385	2,5	6,5	
4	*Nano 4 Premium* с пленкоэлектрокартоном	0,545	11,5	21	20,5
5	*Nano 4 Premium* с пленкоэлектрокартоном	0,504	10	20	

Таблица 3. **Электрическая прочность жидкой изоленты *Nano 4 Premium* (время полимеризации – 96 часов)**

№ п/п	Материал диэлектрика	Результаты измерений			
		толщина образца, мм	$U_{пр}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм	$E_{пр.ср}$, кВ/мм
1	*Nano 4 Premium* с электрокартоном	0,315	2	6,4	7,2
2	*Nano 4 Premium* с электрокартоном	0,370	3	8	
4	*Nano 4 Premium* с пленкоэлектрокартоном	0,65	11	17	18,8
5	*Nano 4 Premium* с пленкоэлектрокартоном	0,63	13	20,6	

Наблюдаемое снижение величины электрической прочности можно объяснить отсутствием сведений, рекомендаций по технологии применения жидкой изоленты *Nano 4 Premium*, требований к условиям проведения ее полимеризации – температуры, времени выдержки, влажности и др.

Возможно, снижение электрических характеристик связано с наличием оставшейся влаги в жидкой изоленте *Nano 4 Premium*, после ее полимеризации. Как известно, наличие влаги существенно снижает электрическую прочность диэлектрика [3].

С увеличением времени полимеризации жидкой изоленты *Nano 4 Premium* заметного влияния на изменение электрической прочности испытываемых образцов не наблюдается.

В результате выполненной работы предложена методика приготовления образцов для определения электрической прочности вновь разрабатываемых полимеризующихся, затвердевающих жидких диэлектриков. Проведены испытания электрической прочности на аппарате АИИ-70 приготовленных образцов жидкой изоленты *Nano 4 Premium* после полимеризации.

Список литературы

1. *Богородицкий*, *Н. П.* Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.

2. ГОСТ 6433.3–71. Материалы электроизоляционные твердые. Методы определение электрической прочности при переменном (частотой 50 Гц) и постоянном напряжении // Библитека ГОСТов и нормативов. – URL: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/gost/42383.php

3. *Важов*, *В. Ф.* Техника высоких напряжений: курс лекций / В. Ф. Важов, В. А. Лавринович. – Томск : Изд-во ТПУ, 2008. – 150 с.

Method of Determining the Electrical Resistance of the Liquid Electrical Tape

Methodology of preparation of standards and determination of electric durability of the again developed polymerizable, solidifiable liquid dielectrics is offered. Its experimental assay is conducted at research of liquid insulating tape of Nano 4 Premium.

Keywords: electric durability; dielectric; standards; tests

УДК 621.311.22

А. А. Штин, кандидат технических наук, доцент
E-mail: shtin_a_a@mail.ru
П. Е. Безруков, студент
E-mail: geerfog@gmail.com
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Трехфазный генератор для лабораторных работ

Рассматривается схема универсального трехфазного генератора, предназначенного для использования в лабораторных работах по электротехническим дисциплинам. Схема проста и выполнена на недорогих логических элементах типа ТТЛ.

Ключевые слова: трехфазный генератор; лабораторный стенд; ТТЛ

В учебном процессе по электротехническим дисциплинам исследуются такие устройства, как трехфазные двигатели и сельсины, а также просто трехфазные потребители. Для постановки соответствующих лабораторных работ, естественно, требуются источники трехфазного напряжения.

Обычно в качестве такого источника используется силовая трехфазная цепь, что предъявляет повышенные требования к технике безопасности. Кроме того, частота сети постоянна, в то время как современные трехфазные двигатели могут использоваться с частотными преобразователями для регулирования скорости вращения ротора.

В данной работе рассматривается трехфазный генератор, который может работать в диапазоне от долей герц до единиц мегагерц с практически идеальным сохранением фазовых соотношений между выходными напряжениями.

Генератор включает источник прямоугольных импульсов и пересчетную логическую схему, формирующую прямоугольные импульсы, сдвинутые на треть периода (рис. 1). Частоту генератора можно изменять в требуемом диапазоне, при этом частота выходных напряжений в шесть раз меньше частоты источника.

На рис. 2 приведена блок-схема лабораторного стенда для исследования трехфазного асинхронного двигателя с использованием предложенного генератора.

© Штин А. А., Безруков П. Е., 2017

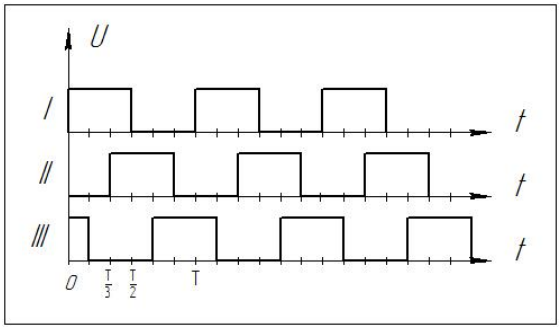


Рис. 1. Выходные сигналы генератора

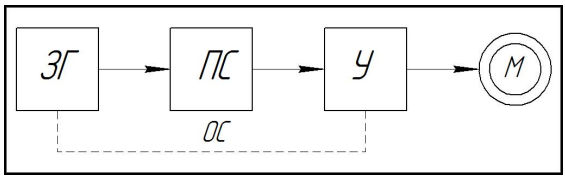


Рис. 2. Блок-схема стенда:
ЗГ – задающий генератор; ПС – пересчетная схема; У – усилитель; М – двигатель

Импульсы с выхода пересчетной схемы усиливаются, при необходимости их форма может быть приближена к синусоидальной с помощью фильтров. Пунктиром показана цепь обратной связи ОС для реализации закона частотного регулирования.

Принципиальная схема задающего генератора и преобразующей схемы приведена на рис. 3.

Задающий генератор построен на таймере NE555 (DD7). Он генерирует прямоугольные импульсы, поступающие на вход пересчетной схемы. Пересчетная схема построена на счетчике 155ИЕ4 (DD1) и простейших логических элементах ТТЛ (DD2...DD6).

На выходах схемы формируются импульсы со скважностью $Q = 2$. Регулирование частоты импульсов происходит путем изменения сопротивления переменного резистора R3. Частота импульсов на выходах пересчетной схемы в 6 раз меньше частоты на выходе таймера. Соответственно верхний предел регулирования в 6 раз меньше максимальной частоты работы NE555 и составляет примерно 85 кГц.

Был собран макет предложенного генератора, который был проверен совместно с трехфазными бесконтактными сельсинами СНБМТ на частоте 400 Гц.

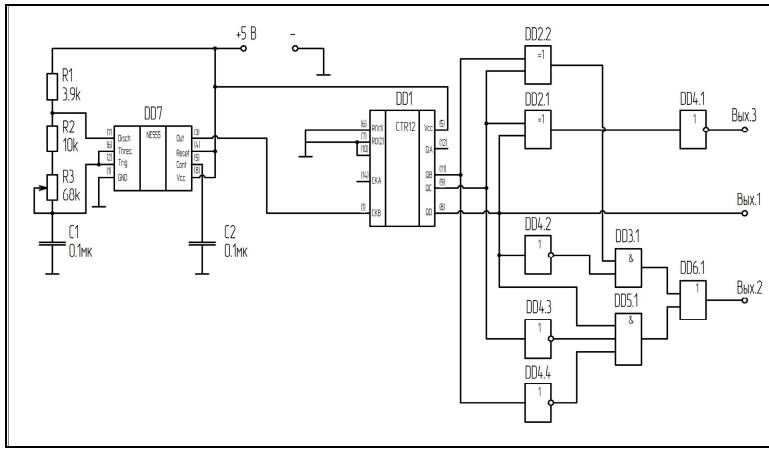


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема генератора

Предварительно схема генератора была промоделирована в программе *Multisim*. Модель генератора и результаты моделирования показаны на рис. 4 и 5.

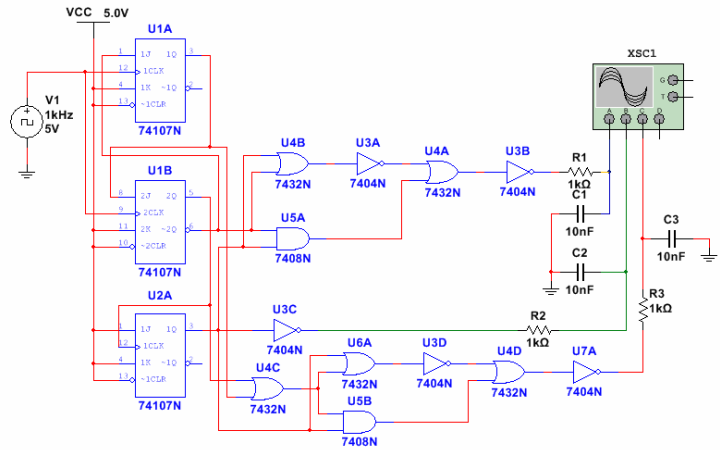


Рис. 4. Модель трехфазного генератора

Заметим, что в связи с отсутствием в *Multisim SPICE*-модели счетчика 155ИЕ4 он был заменен его эквивалентом на JK-триггерах.

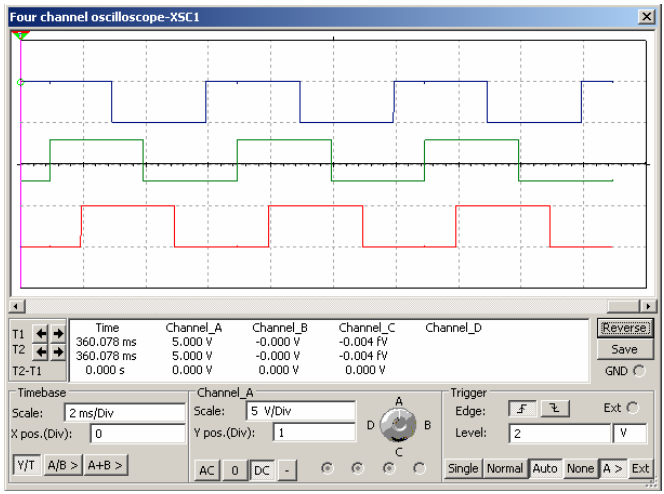


Рис. 5. Показания виртуального осциллографа в *Multisim*

Предложенный трехфазный генератор позволяет исключить применение трехфазной силовой сети в лабораторных стендах. Планируется использование генератора на кафедре «Электротехника» в лаборатории электрических машин.

Список литературы

1. *Гаев, Г. П.* Электротехника и электроника : учеб. для вузов : в 3 кн. / Г. П. Гаев, В. Г. Герасимов, О. М. Князьков и др. ; под ред. проф. В. Г. Герасимова. – Москва : Энергоатомиздат, 1998. – 432 с.

2. *Шестеркин, А. Н.* Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10. – М. : ДМК «Пресс», 2012. – 360 с.

The three-phase generator for the laboratory works

We consider the universal three-phase generator circuit for use in laboratory studies on electro-technical subjects. The generator uses cheaper electrical components.

Keywords: three-phase generator; laboratory bench; TTL

УДК 621.3.02

А. А. Штин, кандидат технических наук, доцент
О. С. Мельников, студент
E-mail: melnikovoleg2017@yamdex.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Лабораторный стенд для испытаний токовых клещей

Статья посвящена разработке лабораторного стенда для исследования цифрового измерительного прибора Актаком-2012. Стенд предназначен для испытаний токовых клещей АТК-2012 в автономном режиме и совместно с персональным компьютером.

Ключевые слова: исследование; разработка; токовые клещи АТК-2012; лабораторный стенд; микропроцессорные приборы

Одной из тенденций в развитии современных измерительных приборов является внедрение в них микропроцессорных устройств, которые позволяют производить:

– обработку результатов измерения;
– запоминание результатов измерения;
– передачу результатов измерения;
– коррекцию погрешностей измерения;
– автоматизацию процесса измерения.

Применение микропроцессоров, прежде всего, позволило улучшить метрологические характеристики, а именно: помехоустойчивость, точность, чувствительность [1].

Для исследования микропроцессорных приборов были выбраны токовые клещи АТК-2012, которые предназначены для измерения переменного тока без разрыва силовой цепи, напряжения, мощности, а также для анализа гармоник тока и напряжения [2].

Токовые клещи Актаком-2012 представлены на рис. 1.

Достоинствами токоизмерительных клещей АТК-2012 являются:

1. Гибкий магнитопровод, который позволяет беспрепятственно измерять электрические величины в пучке проводов или крупных проводниках.

2. Данный прибор имеет широкий диапазон измерений:
$I = 0{,}1\ldots3000$ А; $U = 0{,}1\ldots600$ В; $f = 45\ldots65$ Гц; $P = 0{,}1\ldots9999$ кВт.

© Штин А. А., Мельников О. С., 2017

3. Возможность фиксировать и производить запись максимального, минимального и пикового значения.

4. Токовые клещи АТК-2012 могут работать как в автономном режиме, так и совместно с персональным компьютером, с помощью кабеля интерфейса RS232.

5. В программе *Flexible Power Quality Tester* можно наблюдать спектры переменного тока, напряжения и мощности на экране монитора.

Рис. 1. Токовые клещи АТК-2012

Для исследования микропроцессорного прибора Актаком-2012 был разработан лабораторный стенд, который включает в себя:

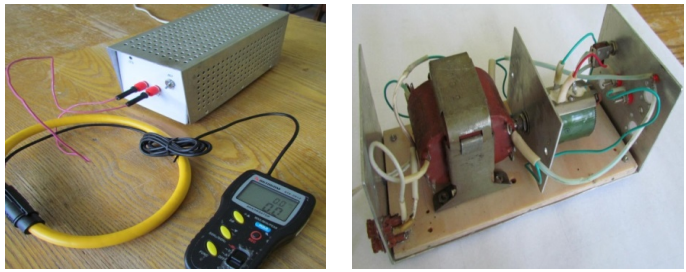
1. Трансформатор напряжения ТН-10-127/220-50
2. Переменный резистор ПП5-50
3. Резистор МЛТ 1,2 кОм
4. Диод КД105Б
5. Индикаторный светодиод
6. Плавкая вставка на 2 А
7. Сетевой шнур
8. Соединительные провода.

Внешний вид лабораторного стенда представлен на рис. 2.

На рис. 3. представлена электрическая принципиальная схема лабораторного стенда.

Принцип работы лабораторного стенда заключается в следующем: при переключении тумблера питания SF1 из состояния «Выкл.» в состояние «Вкл.» напряжение сети подается на первичную обмотку трансформатора T1 через предохранитель FU1. С вторичной обмотки трансформатора T1 напряжение подается на выходные клеммы лабораторного стенда через резистор R1, который определяет величину

измеряемого тока. К выходным клеммам подключаются измерительные токовые клещи АТК-2012, с помощью соединительных кабелей.



а *б*

Рис. 2. Лабораторный стенд с токовыми клещами (*а*);
стенд в открытом виде (*б*)

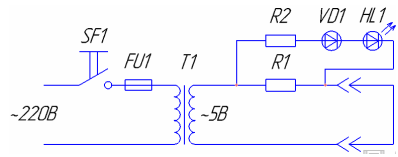


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная лабораторного стенда

Результаты испытания лабораторного стенда

Результат измерения силы переменного тока представлен на рис. 4, другие результаты в табл. 1, 2.

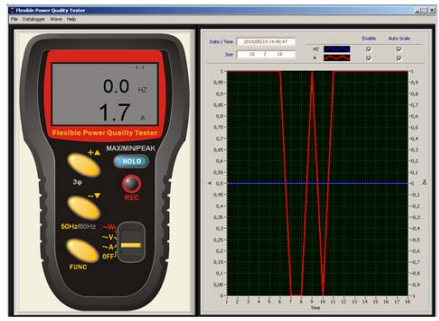


Рис. 4. Показания прибора АТК-2012
при измерении силы переменного тока

Таблица 1. **Спектр переменного тока**

№ гармоники	1	2	3	4	5
I, А	1,7	0	0,17	0	0,12

Таблица 2. **Спектра переменного тока в процентах**

№ гармоники	1	2	3	4	5
I, %	100	0	10,4	0	7,3

Коэффициент гармоник (THD).
(THD) = 0 %.
Коэффициент амплитуды (C.F.).
(C.F.) = 1,08.

Результат измерения переменного напряжения представлен на рис. 5, другие результаты в табл. 3, 4.

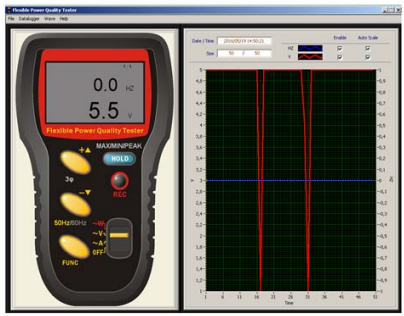


Рис. 5. Показания прибора АТК-2012
при измерении переменного напряжения.

Таблица 3. **Спектр переменного напряжения**

№ гармоники	1	2	3	4	5
U, В	5,5	0	0	0	0

Таблица 4. **Спектр переменного напряжения в процентах**

№ гармоники	1	2	3	4	5
U, %	100	0	4,8	0	3,2

Коэффициент гармоник (THD).
(THD) = 7,7%
Коэффициент амплитуды (C.F.).
(C.F.) = 1,35.

Вывод

Разработан лабораторный стенд для изучения токовых клещей АТК-2012. Он может быть использован совместно с другими аналогичными приборами для изучения методики работы с ними.

Список литературы

1. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах : учеб. пособие / под общ. ред. Б. Н. Тихонова. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 374 с.

2. Руководство по эксплуатации Актаком клещи токовые АТК-2012 // Актаком. – URL: http://www.aktakom.ru/kio/index.php?ELEMENT_ID=7265

Laboratory Stand for Testing Current Clamp

The article is devoted to the development of the laboratory stand for the study of digital measuring device Aktakom 2012. Result Test clamp ATC-2012 in standalone mode and in conjunction with a personal computer.

Keywords: study; development; current clamp ATK-2012; laboratory bench; microprocessor devices

Секция 4. **Информационные технологии в радиотехнике и связи**

УДК 004.71:629.7

А. В. Абилов, кандидат технических наук, доцент
E-mail: albert.abilov@gmail.com
Е. Л. Зиновьева, студентка
E-mail: helen19_96@mail.ru
В. В. Титов, студент
E-mail: shumagorath@mail.ru
В. С. Машковцев, студент
E-mail: vladik_v725@bk.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Обзор квадрокоптера *Erle-Copter* на базе контроллера *Erle-Brain 2*

Представлены общие понятия о квадрокоптерах. Дано подробное описание квадрокоптера Erle-Copter. Детальным образом представлена платформа, на которой он построен и ее возможности. Описаны различные сценарии применения квадрокоптеров.

Ключевые слова: квадрокоптер; мультикоптер; *Erle-Copter*; *Erle-brain 2*; *ROS*; *Raspberry Pi*; *PXFmin*; *Mission Planner*; *APM Planner 2*; наземная станция

Виды мультикоптеров и их состав

В настоящее время активно развивается такое направление беспилотных летательных аппаратов как мультикоптеры и в частности квадрокоптеры. Мультикоптер – это летательный аппарат с произвольным количеством несущих винтов, вращающихся диагонально в противоположных направлениях. Существуют различные виды мультикоптеров, например, бикоптер, трикоптер, квадрокоптер, гексакоптер и др.

Для изучения квадрокоптера первоначально необходимо изучить его структуру в общем виде. Типичный мультикоптер состоит из следующих элементов:

© Абилов А. В., Зиновьева Е. Л., Титов В. В., Машковцев В. С., 2017

1) Мини-компьютер или полетный контроллер – устройство, обеспечивающее управление аппаратом и его стабилизацию в воздухе. К контроллеру подключаются все датчики, приемники, передатчики и контроллеры двигателя.

2) Модуль питания – контроллер, обеспечивающий непрерывное энергоснабжение квадрокоптера, мощность двигателя, необходимое время полета и отвечает за стабильность полета.

3) Аккумулятор. Как правило, мультикоптеры используют литий-полимерные (LiPo) батареи.

4) Двигатель. Вентильный двигатель, также известный как электронно-коммутируемый, является синхронным двигателем с питанием от электрического источника постоянного тока через встроенный или импульсный источник питания инвертора, который производит электрический сигнал переменного тока для привода двигателя. Дополнительные датчики и электроника необходимы для контроля амплитуды выходного сигнала инвертора и частоты.

5) *GPS*-модуль. Система глобального позиционирования (*GPS*) является космической спутниковой навигационной системой, которая обеспечивает информацию о местоположении и времени в любых погодных условиях, в любом месте на территории или вблизи Земли, где есть прямая видимость до четырех или более спутников *GPS*. Данный модуль необходим для управления через телеметрию слежения.

6) *ESC*-регуляторы или контроллеры скорости. Электронный регулятор хода – это устройство для управления оборотами электродвигателя. Данное устройство имеет высокий КПД и не расходует энергию аккумуляторной батареи на бесполезный нагрев, важными характеристиками являются максимальный ток и наличие системы стабилизации питания приемника.

7) Рама – основание, на котором размещается управляющая электроника и аккумулятор, а также моторы с пропеллерами.

8) Набор телеметрии. Квадрокоптер включает в себя радиочастотный канал, который используется для телеметрии и связи станции управления с земли.

9) Пропеллеры. В конструкции используются особые пропеллеры с рабочим режимом вращения по часовой стрелке и рабочим режимом вращения против часовой стрелки. Такая конфигурация необходима для компенсации вращающего момента, возникающего при вращении пропеллера, стремящегося развернуть платформу. Наличие двух пропеллеров, вращающихся в одну сторону, и двух – в другую, компенсирует этот крутящий момент.

Структура квадрокоптера *Erle-Copter*

Рис. 1. Квадрокоптер *Erle-Copter*

В последние годы все большую популярность приобретают квадрокоптеры Erle-Copter от компании Erlerobotics [1, 2]. Он может использовать либо радиотелеметрию (последовательный порт) либо USB и Wi-Fi модули (с помощью UDP-, TCP-протоколов). В конечном виде квадрокоптер представлен на рис. 1.

В квадрокоптере *ErleCopter* используется контроллер *Erle-brain 2* собственной разработки, который базируется на основе открытой аппаратной платформы под управлением свободной *ОС Linux*. Данная платформа представлена на рис. 2. На ее основе возможно создание роботов, дронов, роверов и т. п. Платформа состоит из одноплатного *linux*-компьютера *Raspberry Pi 2 Model B* [3] (рис. 3) и модуля автопилота *PXFmini*.

Рис. 2. Аппаратная платформа *Erle brain 2*

Raspberry Pi 2 Model B построен на базе процессора с архитектурой *ARM® Cortex-A7*, имеет 1 ГБ RAM, в качестве постоянной памяти используется micro sd карта. Он поддерживает все распространённые *Linux*-дистрибутивы, множество основанных на *Linux ОС*, а также *Windows 10*. *Erle-brain 2* поставляется с дистрибутивом *Debian* на борту и установленным фреймворком ROS [4].

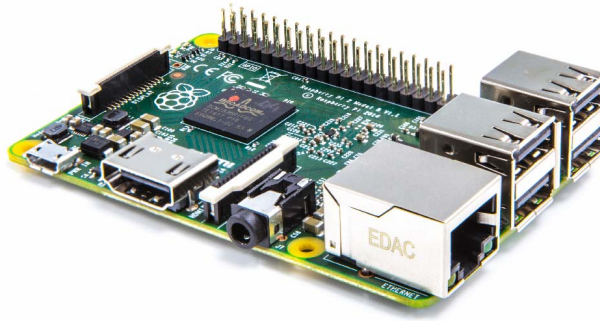


Рис. 3. Одноплатный компьютер *Raspberry Pi 2 Model B*

ROS – это программная платформа, гибкая основа для написания ПО для роботов. Особенностью данной платформы является то, что ПО может работать с различными роботами с незначительными изменениями в коде. Она включает в себя визуализацию, драйвера устройств, аппаратную абстракцию, передачу сообщений между процессами и многое другое. Библиотеки ориентированы на *Unix*-подобные системы, такие как *Ubuntu Linux*. Платформа лицензирована и находится в открытом доступе. Таким образом, получив исходный код из репозитория, можно написать драйвер собственного датчика. Так же *ROS* имеет отличную интеграцию с C++ библиотеками, такими как *Qt*, *Point Cloud Library* и т. д., имеет возможность работать на одноплатных компьютерах, таких как *Raspberry Pi* или микроконтроллерных платформах, как *Arduino*. *ROS* помогает разработать комплексные решения, реализовать алгоритмы и провести интеграцию всех компонентов за минимальный промежуток времени.

Автопилот *PXFmini* (рис. 4) оснащен набором всех необходимых датчиков: гироскоп – для измерения углового ускорения; акселерометр – для измерения ускорения, гравитации и угла наклона; барометр – для измерения высоты и ее удержания; магнитометр (компас) – для удержания направления движения. Помимо датчиков на модуле *PXFmini* располагается ряд портов для подключения различной периферии – дополнительных датчиков (например, компаса, термометра или датчика уровня влажности), модуль *GPS*, устройства телеметрии или радиоуправления.

Для связи с наземной станцией *Erle-brain 2* может использовать Wi-Fi соединение, позволяющее передавать информацию с датчиков, обмениваться данными о геопозиции, транслировать видеосигнал с камеры в реальном времени. Платформа позволяет использовать Wi-Fi

на частототе 2,4 ГГц или 5 ГГц при условии подключения соответствующего адаптера в разъем *USB*. Это позволяет сократить помехи, вносимые другими сетями Wi-Fi в условиях большого города, т. к. большинство сетей работают в диапазоне 2,4 ГГц. Также возможно подключение устройства телеметрии на частоте 433 или 900 МГц в зависимости от региона. Возможно подключение устройства телеметрии на частоте 433 МГц. В качестве наземной станции может выступать любой компьютер под управлением *ОС Windows*, *MAC OSX* или *Linux* с установленным программным обеспечением *Mission Planner* (*Windows*) (рис. 5) или *APM Planner 2* (*Windows*, *MAC OSX*, *Linux*) [5].

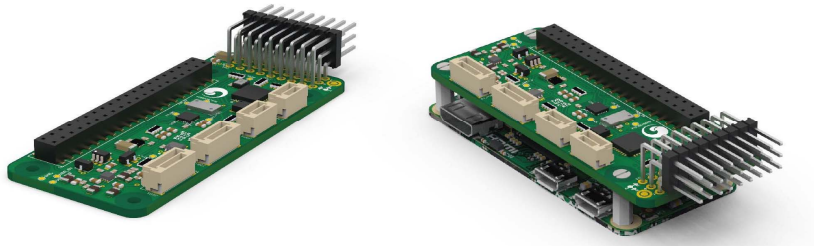


Рис. 4. Автопилот *PXFmini*

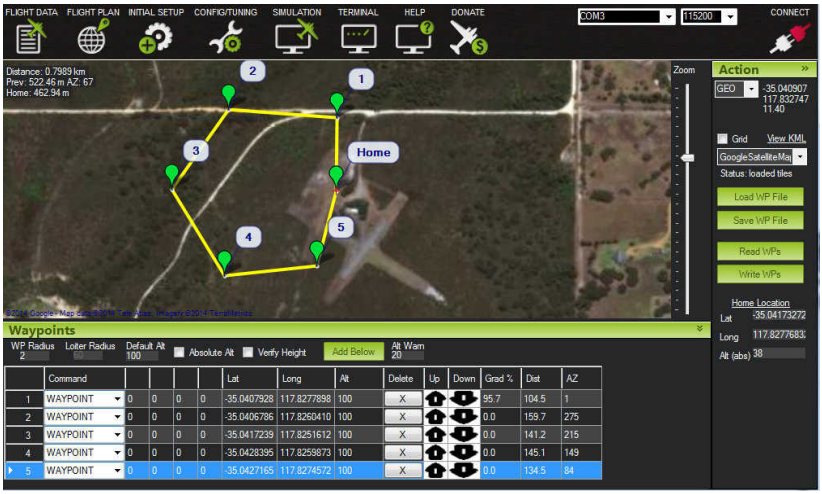


Рис. 5. Интерфейс *Mission Planner*

Сценарии применения квадрокоптера *Erle-Copter*

Возможности рассматриваемой платформы можно расширить, подключив дополнительные устройства. Например, лидар, дальнометр ближнего радиуса действия, помогает избегать столкновений и автоматически обходить препятствия, или трехосевой подвес для камеры, позволяющий управлять поворотом камеры во время полета. Однако наиболее широкое применение находят сценарии, в которых необходима передача видеопотока с борта квадрокоптера на наземную станцию, в частности в сценариях мониторинга местности и поисково-спасательных операциях. При этом наибольший интерес вызывают вопросы обеспечения качества передачи видеопотока. В какой-то степени эти вопросы решаются в работах [6–13].

Изучение квадрокоптеров и их использование помогает решить ряд задач:

– *доставка товаров*: в настоящее время, сделав заказ товаров (продуктов) в интернет-магазине, клиент вынужден ждать свой заказ очень много времени. Использование квадрокоптера в данной ситуации существенно упрощает задачу. Конечно, и такой способ доставки имеет свои недостатки, но он вполне может себя заявить в доставке малых грузов в пределах города;

– *доставка медикаментов*: таким же способом, как и осуществление доставки товаров, можно доставлять различные медикаменты. Например, пострадавшие после чрезвычайных катастроф особенно нуждаются в медикаментах и предметах первой помощи. Эти цели достигаются наиболее эффективнее специально укомплектованными квадрокоптерами (дронами), которые, к примеру, будут доставлять дефибрилляторы в случае сердечного приступа у человека;

– *поиск пропавших*: довольно нередко поисково-спасательным командам трудно отыскать потерпевших. А временами к ним и вовсе непросто добраться. С помощью виртуальных органов чувств у дрона появляется возможность облегчить поисковые работы спасателям, повышая шанс на спасение пострадавших;

– *инспектирование нефтяных автономных вышек*: инспектирование дронами, подразумевает проверку вышек без непосредственного присутствия человека, тем самым предотвращая некоторый риск для жизни;

– *мониторинг местности*: в настоящее время журналистика начинает резко прогрессировать. Использование дронов в данной области представляет собой изучение местности без угрозы жизни оператора. Кроме этого, использование дроны – это возможность предоставлять кадры в реальном времени непосредственно из центра событий. На-

пример, можно использовать дроны для просмотра зараженной территории или во время боевых действий. Так, картинка приобретает новый ракурс, а значит, журналистика выходит на новый уровень;

– *защита дикой природы*: данная цель достигается путем ее мониторинга без непосредственного присутствия человека в среде обитания, что также снижает риски для жизни как людей, так и животных;

– *решение ряда задач в области ведения хозяйства*: здесь подразумевается использование дронов на крупных фермах. Летательный аппарат может быть использован в качестве наблюдения и орошения полей;

Квадрокоптеры в настоящее время активно развивающаяся тема, их изучение и развитие позволят в будущем решать обширный круг задач, но пока возможности квадрокоптеров ограничены временем автономного полета и дальностью связи.

Список литературы

1. URL: http://docs.erlerobotics.com/erle-brain-2 [Документация по миникомпьютеру Erle-Brain 2] (дата обращения: 14.11.2016).

2. URL: http://wiki.ros.org [Документация по операционной системе ROS] (дата обращения:14.11.2016).

3. Raspberry PI 2 Model B. – URL: https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b (дата обращения:14.11.2016).

4. 17 вариантов применения квадрокоптеров // Стартапы.РУ. – URL: http://startapy.ru/применение-дронов-квадрокоптеров (дата обращения: 14.11.2016).

5. ArduPilot Autopilot Suite. – URL: http://ardupilot.org/ardupilot (дата обращения: 14.11.2016).

6. *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. – Т. 6. – № 7. – С. 141–145.

7. *Чунаев*, *А. В*. Влияние характеристик передачи потоковых данных на качество видео в WLAN / А. В. Чунаев, А. В. Абилов, А. И. Нистюк // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – Т. 6. – № 7. – С. 219–224.

8. *Васильев*, *Д. С*. Экспериментальное исследование качества передачи видео в древовидной P2P сети с алгоритмом ARQ прикладного уровня / Д. С. Васильев, А. В. Чунаев, А. В. Абилов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2014. – Т. 8. – № 1. – С. 10–14.

9. *Абилов*, *А. В*. Повышение качества передачи потоковых данных в сетях БПЛА с помощью PULL-PUSH-подхода / А. В. Абилов, Д. С. Васильев // Инфокоммуникационные технологии. – 2014. – Т. 12. – № 4. – С. 45–50.

10. *Чунавев*, *А. В*. Алгоритм AL-ARQ для потоковой доставки видеоданных в беспроводной локальной сети / А. В. Чунавев, А. В. Абилов, М. М. Павлова // Инфокоммуникационные технологии. – 2015. – Т. 13. – № 1. – С. 68–73.

11. *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.

12. *Емельянов*, *В. Н.* Применение адаптивных алгоритмов управления с использованием временного окна для передачи потоковых данных / В. Н. Емельянов, А. В. Абилов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – Т. 6. – № 7. – С. 85–90.

13. *Ревило*, *О. А.* Алгоритмы оценки потерь пакетов с адаптацией по выборке для сетей передачи потоковых данных / О. А. Ревило, В. Н. Емельянов, А. В. Абилов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – Т. 6. – № 7. – С. 161–164.

Overview of Quadrocopter Erle-Copter Based on Erle-brain 2 Controller

The article presents the general concepts of quadrocopters. We give a detailed inventory of quadrocopters-Erle-Copter. Detail shows the platform on which it is built and its possibilities. The possible use of quadrocopters.

Keywords: quadrocopter; multicopter; Erle-Copter; Erle-brain 2; ROS; Raspberry Pi; PXFmin; Mission Planner; APM Planner 2; ground control station

УДК 004.31

А. Ю. Белоусов, студент
E-mail: kjdfutir@yandex.ru
А. В. Захватов, студент
E-mail: a_zakhvatov@mail.ru
А. Ю. Шаимов, студент
E-mail: shaimov-alex@mail.ru
Р. А. Хатбуллин, кандидат технических наук, доцент кафедры «ССиТС»
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Разработка, моделирование и реализация программ на ПЛИС для измерения АЧХ канала

Рассматривается реализация устройства для снятия АЧХ канала, особенности его реализации на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) и моделирования в системе.

Ключевые слова: ПЛИС; *Verilog HDL*; программная реализация; измерение АЧХ

Современные радиоэлектронные устройства содержат интегральные схемы различной сложности и назначения, поэтому их разработка, технология изготовления и программирование является одной из развивающихся областей науки и техники. Доступность, простота освоения работы с ними, визуализация процессов требуют знаний, творческого подхода к разработке таких устройств, умственных усилий и способностей – все это является привлекательной работой для миллионов людей (не являющихся даже инженерами и программистами).

Различные интегральные схемы (микроконтроллеры, микропроцессоры, цифровые сигнальные процессоры, логические элементы, программируемые логические матрицы) предназначены приема, цифровой обработке и передачи сигналов. Программируемые логические интегральные схемы (далее просто ПЛИС) являются наиболее гибкими и универсальными устройствами, т. к. позволяют формировать логику работы ПЛИС в реальном масштабе времени посредством программирования, и адаптировать разрабатываемую электрическую схему для решения задач с изменяющимися параметрами. Логика работы ПЛИС описывается в виде непосредственно электрической схемы или в виде

© Белоусов А. Ю., Захватов А. В., Шаимов А. Ю., Хатбуллин Р. А., 2017

программного кода на специальном языке высокого уровня описания аппаратуры, таких как *Verilog HDL*, *VHDL* или *Vivado*. Разработка структуры функциональных блоков, их взаимодействие, программирование и отладка осуществляются при помощи отладочной программной среды с последующей загрузкой в отладочную плату через программатор.

Для обеспечения работы в реальном масштабе времени ПЛИС имеет более высокое быстродействие по сравнению с контроллерами и процессорами при реализации идентичных функций. Однако универсальность применения и высокое быстродействие достигается технологической сложностью производства для получения высокой степени интеграции полупроводниковых элементов в кристалле, что сказывается на стоимости, ограничивает применение таких элементов для аппаратуры массового производства.

Лидерами на рынке ПЛИС являются *Altera* и *Xlinx*.

Quartus II (QII) — это система проектирования на ПЛИС *Altera*, подходящая для всех выпускаемых семейств микросхем *Altera*. Этапы выполнения проекта на ПЛИС можно условно разделить на следующие части [1]:

1. Создание файла проекта.
2. Анализ и синтез проекта.
3. Трассировка связей и размещение проекта.
4. Временной анализ.
5. Создание базы данных для передачи в другую САПР для моделирования (по необходимости).
6. Программирование конфигурационной памяти.

Таким образом, благодаря большому количеству явных преимуществ при работе на ПЛИС, а также из-за наличия в своем распоряжении отладочной платы *Altera DE2-115* мы остановились на реализации проекта, где были использованы семейство ПЛИС *Cyclone IV* фирмы *Altera*, среда разработки *Quartus II*, язык программирования *Verilog HDL*.

В качестве алгоритма нахождения амплитуды сигнала применяется принцип нахождения синфазной и квадратурной составляющей амплитуды сигнала в конкретный момент времени.

Синфазная составляющая находится как уровень исходного сигнала, а квадратурная – уровень сдвинутого по фазе на 90º исходного сигнала в тот же момент времени.

В простом случае математическую модель можно описать следующим образом:

пусть исходный входной дискретный сигнал записывается в виде

$$S\left(nT_{\text{д}}\right) = A\sin\left(nT_{\text{д}}\right), \tag{1}$$

где n – номер отсчтта сигнала; $T_{\text{д}}$ – период дискретизации; A – амплитуда сигнала.

Синфазная составляющая амплитуды совпадает с исходным сигналом и определяется как

$$A_C = A\sin\left(nT_{\text{д}}\right). \tag{2}$$

Квадратурная составляющая амплитуды является повернутым по фазе на 90º исходным сигналом и определяется как

$$A_K = A\sin\left(nT_{\text{д}} + \frac{\pi}{2}\right) = A\cos\left(nT_{\text{д}}\right). \tag{3}$$

Возведя данные составляющие в квадрат и складывая их правые и левые части, запишем:

$$A_C^2 + A_K^2 = \left(A\sin\left(nT_{\text{д}}\right)\right)^2 + \left(A\cos\left(nT_{\text{д}}\right)\right)^2. \tag{4}$$

Используя основное тригонометрическое тождество, получим

$$A_C^2 + A_K^2 = A^2. \tag{5}$$

Откуда и определим амплитуду исходного сигнала:

$$A = \sqrt{A_C^2 + A_K^2}. \tag{6}$$

Однако стоит учесть, что при реализации появляется задержка, связанная с инертностью работы блока поворота фазы сигнала (преобразователь Гильберта).

Структурная схема снятия АЧХ-канала представлена на рис. 1.

Структурная схема включает в себя ПЭВМ (*1*), блок управления (*2*), АЦП фильтр высоких частот (*3*), элемент задержки (*4*), преобразователь Гильберта (*6*), блоки возведения в квадрат (*5* и *6*), сумматор, блок извлечения квадратного корня (*8*), выходной регистр (*9*). По завершении определения значения амплитуды, ее величина пересылается в ПЭВМ (*1*) ответной квитанцией.

Моделирование данной схемы снятия АЧХ-канала было выполнено в среде *Matlab* [2] Структура модели приведена на рис. 2.

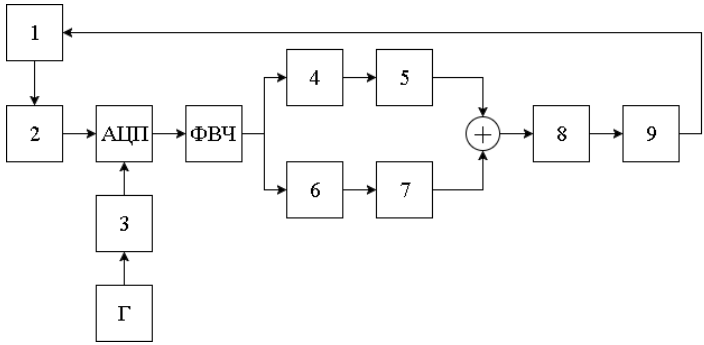


Рис. 1. Структурная схема снятия АЧХ-канала

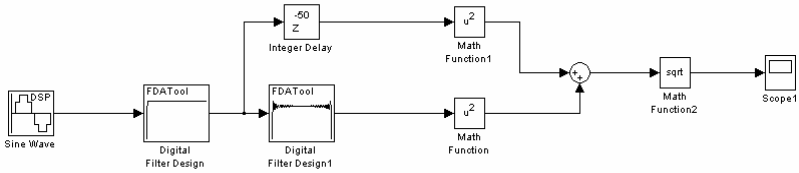


Рис. 2. Модель в программе *Matlab*

Программа *Matlab* реализует алгоритм снятия АЧХ приемного тракта с последующей обработкой на ПЭВМ. Ниже приведен алгоритм работы модели. По команде оператора отсчеты входного сигнала поступают в фильтр высоких частот с целью подавления постоянной составляющей, которая присутствует во входном сигнале.

Отсчеты с выхода фильтра одновременно поступают в преобразователь Гильберта для формирования квадратурной составляющей и в элемент задержки для обеспечения когерентности сигналов.

Отсчеты, полученные путем преобразования и прошедшие через элемент задержки, возводятся в квадрат.

Возведенные в квадрат отсчеты суммируются.

После сумматора сумма квадратов поступает на элемент извлечения квадратного корня.

На выходе модели формируется искомая амплитуда.

Контроль результата моделирования выполняется по виртуальному осциллографу (рис. 3).

Полученное значение амплитуды записывается в память – выходной регистр (*9*) (рис. 1), и передается по интерфейсу связи в ПЭВМ

в виде ответной квитанции в рамках протокола обмена между ПЛИС и ПЭВМ.

Графики результатов моделирования представлены на рис. 3. На верхнем графике изображена вычисленная амплитуда, на нижнем – сигнал с генератора. Время установления выходной амплитуды составляет не более 0,2 мс.

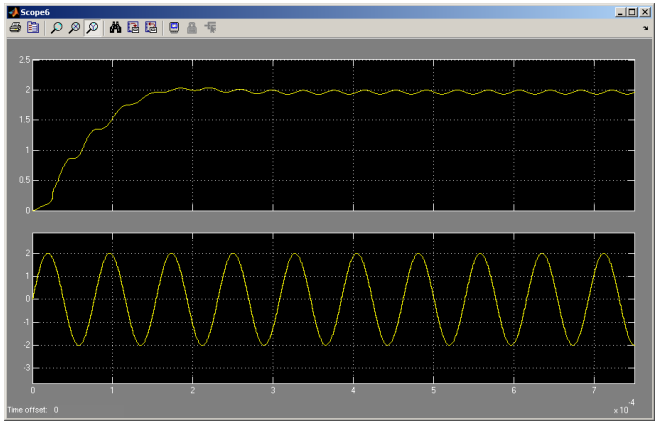


Рис. 3. Графики результата моделирования

Структурная схема для снятия АЧХ-канала на ПЛИС идентична рис. 1.

Данная структурная схема включает в себя ПЭВМ (*1*), с которого поступают команды на блок управления (*2*), разрешающий работу АЦП для формирования отсчетов входного сигнала, подаваемого с генератора. Оцифрованный сигнал подается на фильтр высоких частот для того, чтобы убрать постоянную составляющую, появляющуюся в результате прохождения сигнала по каналу (*3*). Затем полученные отсчеты одновременно подаются на элемент задержки (*4*), который формируется путем создания сдвигового регистра с 101 ячейкой. Данная величина определяется порядком преобразователя Гильберта (*6*). После чего отсчеты возводятся в квадрат (блоки *5* и *6*). Элемент возведения в квадрат формируется стандартной утилитой *Quartus II Megawizard plug-in manager*. Выбираем блок умножения *Altfp Mult*. Результат суммируется. Из суммы извлекается квадратный корень (блоком *8*). Элемент нахождения корня формируется стандартной утилитой *Quartus II Megawizard plug-in manager*, где выбираем элемент *Altfp_Sqrt*. В результате получаем значение амплитуды входного сиг-

нала, которое записывается в выходной регистр (*9*). По завершении определения значения амплитуды ее величина пересылается в ПЭВМ (*10*) ответной квитанцией.

Время вычисления амплитуды входного сигнала составляет 20 мс. При снятии АЧХ в диапазоне от 10 до 800 кГц с шагом 10 кГц ожидаемое время снятия характеристики, без учета времени, затрачиваемого на перестройку частоты генератора, составляет 1,58 с.

Цифровая схема, реализованная на ПЛИС, измерения АЧХ представлена на рис. 4, 5. Она содержит следующие блоки:

Two – блок управления, в котором осуществляется прием команды и передача ответной квитанции по последовательному интерфейсу RS-232, коммутация данных с одного из десяти АЦП, выработка сигналов, разрешающих работу остальных блоков, входящих в схему;

Read_ADC – блок чтения отсчетов с АЦП;

HighPass – блок, представляющий фильтр высоких частот;

Fir Hilbert – блок, реализующий преобразователь Гильберта;

Delay – блок, задерживающий сигнал на определенное количество отсчетов.

В качестве примера разберем работу элемента сдвига [3]. Программный код на языке *Verilog HDL* с комментариями выглядит следующим образом:

```
module DELAY ( //объявление модуля, реализующий элемент задержки
input CLOCK_2      // входной провод с тактовой частотой 2 МГц
input [11:0]ram3,  // шина входных данных разрядностью 12
output reg [11:0]reg_delay // 12-разрядный регистр задержанных
                           // данных
);
reg [9:0]count_delay=0;  // счетчик тактовых импульсов
reg [5:0]perem=0;        // регистр адреса памяти хранения
                         // входного отсчёта
reg [11:0]ram_save[100:0];  // память хранения входных отсчетов
always @(posedge CLOCK_2 )  // задание блока чувствительности к
                            // тактовой частоте */
begin
ram_save[perem]<=ram3;  // сохранение входного отсчета в ячейку
                        // памяти по текущему адресу perem
count_delay <=count_delay + 1;         // инкремент счета
if (count_delay==101|count_delay==102) // осуществление задержки
                                       // на 101 такт
begin
count_delay<=101;  // по достижению счетчиком величины задержки
reg_delay<=ram_save[perem];  // разрешение передачи входных
                             // отсчетов в выходной регистр
end
perem=perem+1;   // модификация адреса ячейки памяти
if (perem==101)  // создание циклического буфера памяти
perem<=0;        // обнуление адреса обращения к ячейке памяти
end
endmodule        // завершение модуля
```

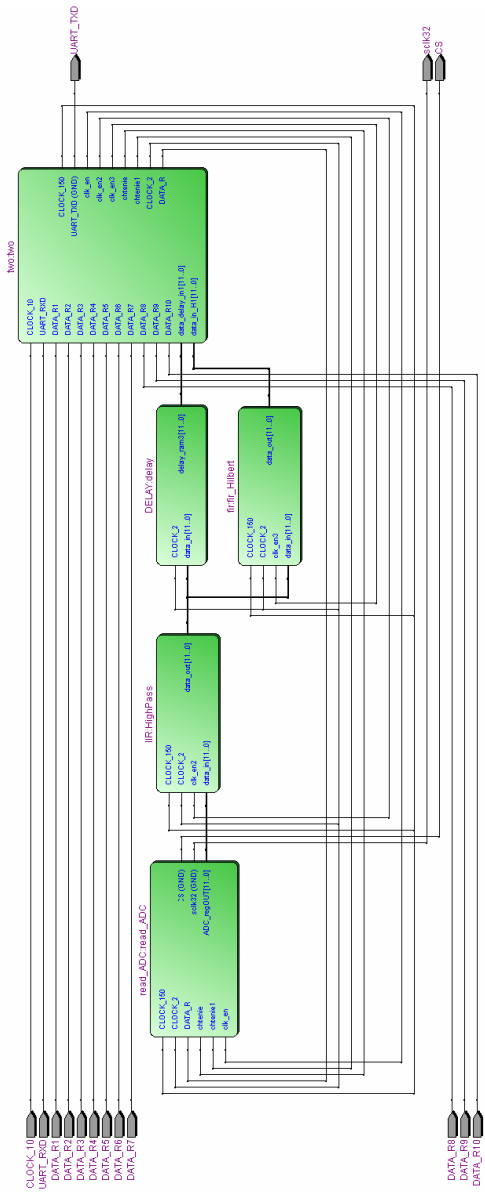


Рис. 4. Цифровая схема измерителя АЧХ

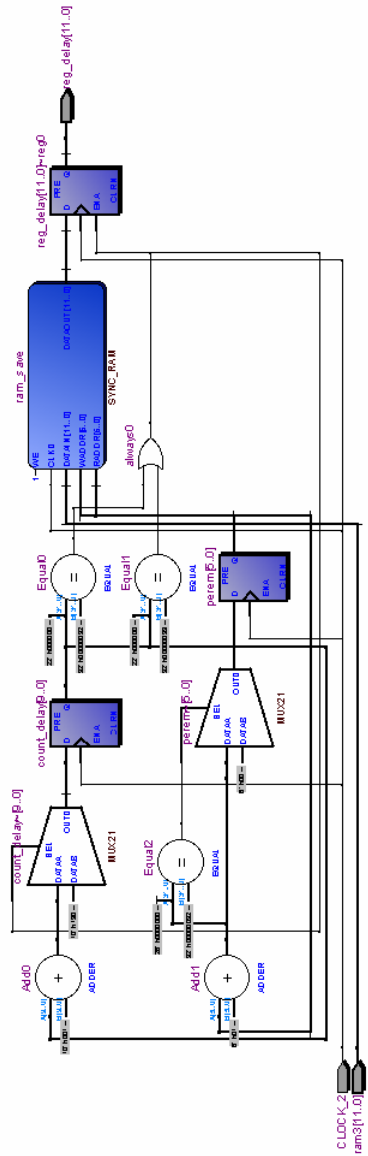


Рис. 5. Цифровая схема элемента задержки

Вывод

Данная реализация измерителя АЧХ на ПЛИС позволяет снимать АЧХ приемного канала в диапазоне 10–800 кГц. Погрешность вычисленной амплитуды составляет не более 4 %. Полученные знания и программные блоки будут применяться в дальнейшем для синтеза других более сложных систем и алгоритмов ЦОС.

Список литературы

1. *Ковриga*, *И.* Особенности работы в среде проектирования ПЛИС Altera Quartus II. Первый проект // Инженерная микроэлектроника. – 2012. – № 5(115). – С. 50–55.

2. *Солонина*, *А. И.* Цифровая обработка сигналов. Моделирование в Matlab / А. И. Солонина, С. М. Арбузов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2008. – 816 с.

3. *Поляков*, *А. К.* Языки VHDL и Verilog в проектировании цифровой аппаратуры. – М. : СОЛОН-Пресс, 2003. – 320 с.

Development, modeling and implementation of FPGA programs for measuring the frequency response of a channel

This article examines the implementation of the device for removing the frequency response of the channel, the features of its implementation on a programmable logic integrated circuit (FPGA) and modeling in the system.

Keywords: FPGA; Verilog HDL; software implementation; measurement of frequency response

УДК 681.3.014

М. А. Бояршинов, кандидат технических наук, доцент
В. Н. Кайшев, студент
А. И. Нистюк, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «ССиТС»
E-mail: kaf_sts@istu.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Особенности выбора оборудования при организации корпоративной сети телефонной связи между несколькими удаленными объектами

Рассмотрена ситуация проектирования цифровой корпоративной телефонной сети компании ООО «КОМиИН». Выбор цифровой сети обусловлен универсальностью использования таких сетей, также из-за стремления перехода на полностью цифровые сети. Развитие телефонных сетей с применением IP-телефонии позволит снизить оплату телефонных переговоров и затраты на поддержание инфраструктуры. В плане развития IP-телефонии является создание одной технической платформы, позволяющей соединить имеющиеся решения для передачи и получения голосовой информации, которую можно использовать в бизнес-процессах.

Ключевые слова: корпоративная; IP-телефония; сеть; удаленные объекты; оборудование

Введение

Под корпоративной телефонной сетью (КТС) понимается сектор телекоммуникаций, обеспечивающей современный телефонный сервис (внутренние, внешние и междугородние переговоры, аудио и видео конференции, передача сообщений, голосовая почта и т. п.) для абонентов [1–4].

Объектом исследования выступает научно-производственная компания ООО «КОМиИН».

Научно-производственная компания ООО «КОМиИН»

Главный офис компании, занимающий 9 этажей, расположен в центре города, а производственные корпуса – на краю города. Общее число пользователей около 1000 человек.

Ввиду того, что офисы компании расположены в нескольких достаточно удаленных друг от друга зданиях, возникла задача построения корпоративной телефонной сети, как сети связи между удаленными

© Бояршинов М. А., Кайшев В. Н., Нистюк А. И., 2017

объектами (рис. 1). В данной схеме видно, что сервер *CallManager* расположен в центральном офисе. Он обеспечивает сервисы корпоративной IP-телефонии для всех зданий.

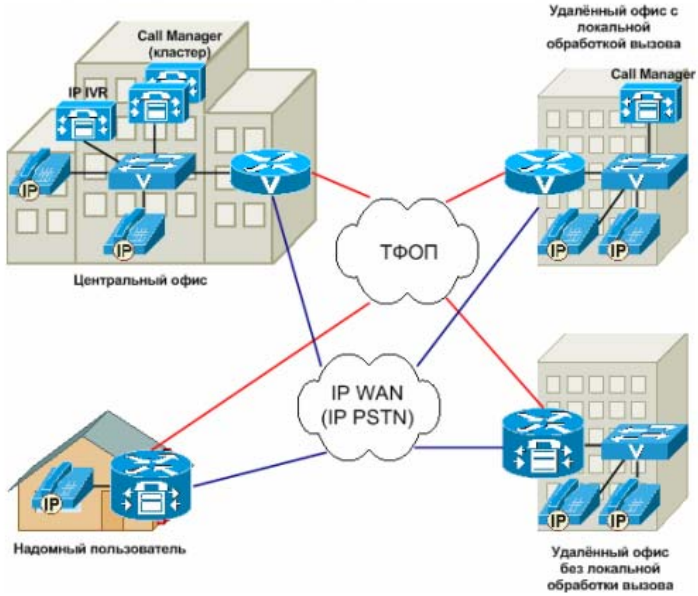


Рис. 1. Схема построения сети между зданиями офисов

CallManager управляет телефонными соединениями, следит за функционированием телефонов, расположенных во всех точках КТС.

Одна из задач, стоявшая при разработке корпоративной сети телефонной связи для ООО «КОМиИН», – это выбор протокола установления соединений и выбор аппаратуры, обеспечивающей эффективную работу сети при допустимых затратах на ее приобретение.

При построении корпоративной телефонной сети на базе IP-телефонии одним из важных вопросов является выбор протокола установления соединений. Существует три вида таких протоколов: H.323, являющийся основным стандартом для сетевых мультимедиа-приложений, SIP и протоколы использующие принципы декомпозиции шлюзов, например MGCP (RFC 2705). Наиболее распространенные протоколы, на базе которых строятся КТС, являются H.323 и SIP, поэтому выбор был произведен среди этих протоколов.

Протокол H.323

Среди мультимедийных стандартов наиболее освоен стандарт H.323 ITUT, к тому же он постоянно совершенствуется. Рекомендация H.323, исторически первый способ осуществления вызовов в сети IP, предусматривает следующие виды информационного обмена:

– цифровое аудио;

– цифровое видео;

– данные (обмен файлами или изображениями);

– управление соединением (обмен информацией о поддерживаемых функциях, управление логическими каналами и т. д.);

– управление установлением и разъединением соединений и сеансов связи.

– каналы передачи данных, механизмов *QoS*, развитости технологии компрессии речи на базе *DSP*.

Протокол *SIP*

Протокол инициирования сеансов – *Session Initiation Protocol* (*SIP*) – является протоколом прикладного уровня и предназначается для организации, модификации и завершения сеансов связи: мультимедийных конференций, телефонных соединений и распределения мультимедийной информации. Пользователи могут принимать участие в существующих сеансах связи, приглашать других пользователей и быть приглашенными ими к новому сеансу связи. Приглашения могут быть адресованы определенному пользователю, группе пользователей или всем пользователям.

Протокол *SIP* предусматривает три способа организации конференции: с использованием устройства управления конференциями *MCU*, режима многоадресной рассылки и соединений участников друг с другом. В последних двух случаях функции управления конференциями могут быть распределены между терминалами, т. е. центральный контроллер конференций не нужен. Это позволяет организовывать конференции с практически неограниченным количеством участников. Рекомендация H.323 предусматривает те же три способа, но управление конференцией во всех случаях производится централизованно контроллером конференций *MC* (*Multipoint Controller*), который обрабатывает все сигнальные сообщения. Поэтому для организации конференции, во-первых, необходимо наличие контроллера *MC* у одного из терминалов, во-вторых, участник с активным контроллером *MC* не может выйти из конференции. Кроме того, при большом числе участников конференции *MC* может стать «узким местом». Протокол *SIP* изначально ориентирован на использование в IP-сетях с поддерж-

кой режима многоадресной рассылки информации. Этот механизм используется в протоколе *SIP* не только для доставки речевой информации (как в протоколе H.323), но и для переноса сигнальных сообщений.

В протоколе *SIP* есть возможность указывать приоритеты в обслуживании вызовов, поскольку во многих странах существуют требования предоставлять преимущества некоторым пользователям. В протоколе H.323 такой возможности нет.

Масштабируемость сети (*scalablllty*). Сервер *SIP* по умолчанию не хранит сведений о текущих сеансах связи и поэтому может обработать больше вызовов, чем привратник H.323, который хранит эти сведения (*statefull*). Отсутствие таких сведений, по мнению некоторых специалистов, может вызвать трудности при организации взаимодействия сети IP-телефонии с ТФОП.

Следующей существенной характеристикой протоколов является время, которое требуется, чтобы установить соединение. В запросе *INVITE* протокола *SIP* содержится вся необходимая для установления соединения информация, включая описание функциональных возможностей терминала. Таким образом, в протоколе *SIP* для установления соединения требуется одна транзакция, а в протоколе H.323 необходимо производить обмен сообщениями несколько раз. По этим причинам затраты времени на установление соединения в протоколе SIP значительно меньше затрат времени в протоколе H.323.

Протокол H.323, несомненно, сложнее протокола *SIP*. Общий объем спецификаций протокола H.323 составляет примерно 700 страниц. Объем спецификаций протокола *SIP* составляет 150 страниц. Протокол H.323 использует большое количество информационных полей в сообщениях (до 100) при нескольких десятках таких же полей в протоколе *SIP*. При этом для организации базового соединения в протоколе *SIP* достаточно использовать всего три типа запросов (*INVITE*, *BYE* и *ACK*) и несколько полей (*To*, *From*, *Call-ID*, *CSeq*).

На основе проведенного выше сравнения протоколов H.323 и *SIP* можно сделать вывод о том, что протокол *SIP* больше подходит для использования в КТС, где интегрированы различные виды сервисов. У протокола *SIP* более выгодная, с точки зрения построения, архитектура сети, простота реализации дополнительного функционала делает еще более привлекательным для внедрения.

Для более эффективной разработки корпоративной сети телефонной связи было выбрано аппаратное обеспечение *Cisco*, т. к. именно компания *Cisco* поставляет на рынок законченные решения, не требующие дополнительных затрат и программно-аппаратных компонент.

Создание сети на основе *AVVID*, в составе которой находится система IP-телефонии, наиболее эффективно в случаях основательной реконструкции, либо создания с нуля телекоммуникационной системы предприятия.

Маршрутизатор

Основная функция маршрутизатора – объединение в общую сеть, а также установка соединения и подключение ПК к Интернету, защита от внешних угроз, контроль и шифр трафика, раздача IP-адреса, регулировка посещаемости ресурсов и доступа пользователей в сети.

Для сравнения взяли два маршрутизатора: маршрутизатор Cisco 2951 и маршрутизатор Cisco 3925.

Краткая характеристика маршрутизатора Cisco 2951 (рис. 2): маршрутизатор, 3 порта 10/100/1000BaseT Ethernet, 4 слота EHWIC, 2 слота PVDM3, 1 слот SM, 1 слот ISM, блок питания AC.

Маршрутизатор Cisco 3925 (рис. 3): маршрутизатор, 2 порта 10/100/1000BaseT Ethernet, 2 комбо порта 10/100/1000BaseT |SFP, SPE-250, 4 слота SM, 3 слота EHWIC.

Рис. 2. Маршрутизатор Cisco 2951

Рис. 3. Маршрутизатор Cisco 3925

Как видно из табл. 1, оба маршрутизатора удовлетворяют требованиям задачи, поэтому остановили выбор на модели Cisco 2951, т. к. он имеет меньшую входную мощность, габариты, и находится в другом ценовом диапазон в отличие от маршрутизатора Cisco 3925.

Таблица 1. **Технические характеристики маршрутизаторов**

Технические характеристики	Cisco 2951	Cisco 3925
Встроенные средства аппаратного ускорения шифрования (IPSec + SSL)	Да	Да
Число сеансов Cisco Unified SRST	250	730
Число сеансов Cisco Unified CCME	150	250
Всего встроенных портов WAN LAN 10/100/1000 (3 порта)	3	3
Порты RJ-45	3	3
Порты SFP (блокирует порт RJ-45 – 2 из 3-х портов)	1	2
Слоты для сервисных модулей	2	2
Сдвоенные слоты для сервисных модулей	1	1
Слоты для EHWIC	4	4
Сдвоенные слоты для EHWIC	2	2
Слоты для ISM	1	1
Слоты для встроенного DSP (PVDM)	3	4
Память DDR2 ECC DRAM – по умолчанию	512 МБ	1 ГБ
Память (DDR2 ECC DRAM) – максимально	2 ГБ	2 ГБ

Коммутатор

Базовой концепцией коммутации потоков является обнаружение продолжительных потоков данных между двумя IP-узлами.

Сравним несколько коммутаторов компании Cisco (рис. 4–6, табл. 2):

– коммутатор Cisco Catalyst WS-C3560E-12D-S, Layer3, 12 портов X2 10G, IP Base (рис. 4);

– коммутатор Cisco Catalyst WS-C3560E-24PD-S, Layer3, 24 порта PoE Ethernet 10/100/1000 Мбит/с, 2 X2 10 Gigabit Ethernet uplinks, Cisco Inline Power, PoE (рис. 5);

– коммутатор Cisco Catalyst WS-C2960-24TC-S, Layer2, 48 порта 10/100Base-TX, 2 комбинированных порта 10/100/1000Base-T/SFP ПО LAN Lite (рис. 6).

Рис. 4. Коммутатор Cisco Catalyst WS-C3560E-12D-S

Рис. 5. Коммутатор Cisco Catalyst WS-C3560E-48PD-S

Рис. 6. Коммутатор Cisco Catalyst WS-C2960-24TC-S

Таблица 2. **Технические характеристики коммутаторов**

Показатели	Cisco Catalyst WS-C3560E-12D-S	Cisco Catalyst WS-C3560E-48PD-S	Cisco Catalyst WS-C2960-24TC-S
Количество портов	12×X2	48	24
Интерфейсы	1×RJ-45 сетевого управления, 12×X2 10 Gigabit Ethernet	1 x RJ-45 сетевого управления, 48×RJ-45 PoE + 10/100/1000 Base-T сети LAN, 2 X2 10 Gigabit Ethernet uplinks	24 порта 10/100Base-TX, 2 комбинированных порта 10/100/1000 Base-T/SFP ПО LAN Lite
Внутренняя пропускная способность	128 Гбит/с	128 Гбит/с	1 Гбит/с
Объем оперативной памяти	128 МБ	128 МБ	64 МБ
Объем флеш-памяти	64 МБ	64 МБ	32 МБ
Поддержи-ваемые стандарты	EEE 802.3, IEEE 802.3u, IEEE 802.3z, IEEE 802.1D, IEEE 802.1Q, IEEE 802.3ab, IEEE 802.1p, IEEE 802.3x, IEEE 802.3ad (LACP), IEEE 802.1w, IEEE 802.1x, IEEE 802.1s	EEE 802.3, IEEE 802.3u, IEEE 802.3z, IEEE 802.1D, IEEE 802.1Q, IEEE 802.3ab, IEEE 802.1p, IEEE 802.3x, IEEE 802.3ad (LACP), IEEE 802.1w, IEEE 802.1x, IEEE 802.1s	–
Размеры, мм	445×44×460	445×44×460	44×445×236
Вес, кг	10,7	8,3	3,6

Выбрали коммутатор Cisco Catalyst WS-C3560E-48PD-S, т. к. он имеет преимущества:

– обеспечивающее широкополосное подключение оконечных устройств на скорости 10/100/1000 Мбит/с;

– подключение к верхней ступени сети агрегации или ядру на скорости Gigabit Ethernet или 10 Gigabit Ethernet (10 GbE);

– высокопроизводительная маршрутизация трафика IP;

– стекирования;

IP-телефон

IP телефон (он же *SIP* или *VoIP*-телефон) – это устройство, которое выглядит как традиционный телефонный аппарат, но при этом использует для передачи голоса локальную сеть или Интернет.

Сравнили несколько IP-телефонов компании Cisco.

IP-телефон Cisco CP-9971 с камерой. Видеотелефон. Протоколы: SIP, SCCP. USB-камера, HD-звук, 6 телефонных линий, сенсорный цветной дисплей, громкая связь, разъем для гарнитуры, PoE 802.3af, WiFi 802.11 a/b/g (рис. 7).

Рис. 7. Телефон Cisco CP-9971 с камерой

IP-телефон Cisco CP-8961. Видеотелефон. Протоколы: SIP, SCCP. HD-звук, 5 телефонных линий, цветной дисплей, громкая связь, разъем для гарнитуры, PoE 802.3af (рис. 8).

Рис. 8. IP-телефон Cisco CP-8961

IP-телефон Cisco CP-9971. Видеотелефон. Протоколы: SIP, SCCP. HD-звук, 6 телефонных линий, сенсорный цветной дисплей, громкая связь, разъём для гарнитуры, PoE 802.3af, WiFi 802.11 a/b/g (рис. 9).

Рис. 9. IP-телефон Cisco CP-9971

Выбрали IP видеотелефон Cisco 9971, т. к. он является передовым конечным устройством, обеспечивающим передачу голоса, видео, поддерживающий приложения.

Основные особенности IP-телефона Cisco 9971:

– большой сенсорный цветной LCD дисплей;

– 6 телефонных линий;

– видеокамера 2.0MP с поддержкой H.264 со скоростью 24к/с @VGA, 30к/с @CIF;

– встроенный коммутатор: 2 порта RJ-45 10/100/1000BASE-T;

– встроенный WiFi 802.11 a/b/g интерфейс;

– встроенный Bluetooth-интерфейс для подключения беспроводной гарнитуры;

– с блоком питания;

– встроенные USB-порты;

– большое количество мелодий звонка: доступно более 24 мелодий звонка;

– языковая поддержка: встроенная поддержка более 30 языков;

– поддержка протоколов сигнализации: Skinny Client Control Protocol (SCCP) и Session Initiation Protocol (SIP) с контролем вызовов Cisco.

Сервер

Серверы доступа Cisco – это гибридные серверы доступа, сочетающие в себе возможности предоставления доступа по аналоговым телефонным линиям для мобильных и удаленных пользователей. За счет одновременной поддержки аналоговых и ISDN подключений,

Cisco AS535-8E1-210-AC (рис. 10, табл. 3), подключенные в корпоративные сети, могут обеспечить традиционный доступ в сеть с использованием аналоговых линий и в ISDN-линии.

Рис. 10. Сервер Cisco AS535-8E1-210-AC

Основные характеристики серверов доступа Cisco AS535-8E1-210-AC:

– высокая производительность async/ISDN/VoIP;

– опция IP-телефонии;

– возможности управления модемами в процессе установки соединений;

– поддержка Voice over IP.

Таблица 3. **Технические характеристики сервера Cisco AS535-8E1-210**

Количество слотов	3 (DFC-слоты)
Другие интерфейсы	2 порта Fast Ethernet. 2 синхронных последовательных порта. T1/E1 DS1 транк DFC. До 24 портов структурированного E1/ISDN PRI. До 216 встроенных модемов. До 216 голосовых/факс портов
Процессор	250 МГц (RISC)
Flash память	8 МБ Boot Flash; 32 МБ System Flash
RAM память	128 МБ SDRAM

Шлюз

Шлюз Cisco 3725 4-port FXS + 4 port FXO Bundle (рис. 11) с 8 аналоговыми портами предназначен для преобразования VoIP потока переданного по сетям Интернет в аналоговый сигнал подаваемый к телефонным аппаратам или мини-АТС.

Cisco предоставляет решение, способное поддерживать большое количество традиционных устройств телефонии совместно с устройствами IP-телефонии. Использование 16- или 36-портовых EtherSwitch-модулей с поддержкой Inline Power, аналоговых и цифровых интерфейсов, а также голосовых возможностей Cisco IOS позволяет совместить отдельные сети PBX телефонии и передачи данных, объединив их в одну. Значительная экономия средств достигается за счет финансирования одного решения, а не двух параллельных, и, соответственно,

за счет уменьшения затрат на развертывание, техническую поддержку и обучение персонала.

Рис. 11. Шлюз Cisco 3725 4-port FXS + 4 port FXO Bundle

Аналоговый телефон

Телефон проводной Philips CRD200W/51 (рис. 12).

Рис. 12. Телефон проводной Philips CRD200W/51

Общие характеристики и функции:
– журнал вызовов на 48 записей;
– 9 сигналов вызова;
– поддержка стандартов определения номера: FSK, DTMF;
– потребляемая мощность 0,18 мВт;
– масса: 116,2 г;
– размеры: 45×181×49 мм (В×Ш×Д).

ИБП

ИБП серии HIP отвечает основным требованиям, предъявляемым к ИБП, обеспечивающих защиту рабочих станций, серверов, ЦОДов, промышленного, телекоммуникационного, сетевого и др. оборудования.

Источник бесперебойного питания 20 кВА серии HIP, с АКБ (ток заряда 5,7 А) SNR-UPS-ONT-40-HIPXL33 (рис. 13) – 3-фазные ИБП с высоким КПД, модульной конструкцией и схемой параллельного

резервирования N+X, благодаря которой ИБП обеспечивают надежную защиту для центров обработки данных, промышленного, телекоммуникационного, медицинского оборудования. Данная модель оснащена 20 аккумуляторными батареями 38 АН.

Рис. 13. ИБП серии HIP

ИБП может работать как отдельный источник питания, так и в составе параллельных систем, допускается параллельное соединение до 4 источников бесперебойного питания.

Основные особенности:

– 3 фазы на входе и 3 фазы на выходе;

– ИБП построен по схеме on-line (схема двойного преобразования напряжения);

– ИБП работает по технологии цифровой обработки сигнала (DSP), что обеспечивает высочайшую надежность и эксплуатационные характеристики;

– IGBT-выпрямитель обеспечивает низкий коэффициент нелинейных искажений (менее 5 %) и высокий коэффициент мощности;

– широкий диапазон входного напряжения и частоты;

– load bus synchronization (LBS) шина синхронизации, обеспечивающая синхронизацию двух или более систем ИБП;

– коэффициент мощности на выходе: 0,8;

– низкий уровень шума < 56 дБ;

– возможность параллельного резервирования;

– экономичный режим работы (ECO);

– холодный старт;

– оптимизированная аккумуляторная батарея, количество элементов батареи конфигурируется: 32/34/36/38/40 элементов;

– широкий диапазон входного напряжения и частоты;

– автоматический байпас;

– автоматический поиск неисправностей;

– опции: плата SNMP/плата для центрального мониторинга/модуль параллельной работы.

Схема КТС

Для соединения трех офисов в одну корпоративную телефонную сеть составили структурную схему (рис. 14). Сервер CallManager, рас-

положен в центральном офисе ООО «КОМиИН». Он обеспечивает сервисы корпоративной IP-телефонии для всех зданий. CallManager управляет телефонными соединениями и следит за функционированием телефонов, расположенных во всех точках КТС. В центральном офисе реализованы 400 абонентских соединений: 398 цифровых пользователей и 2 аналоговых.

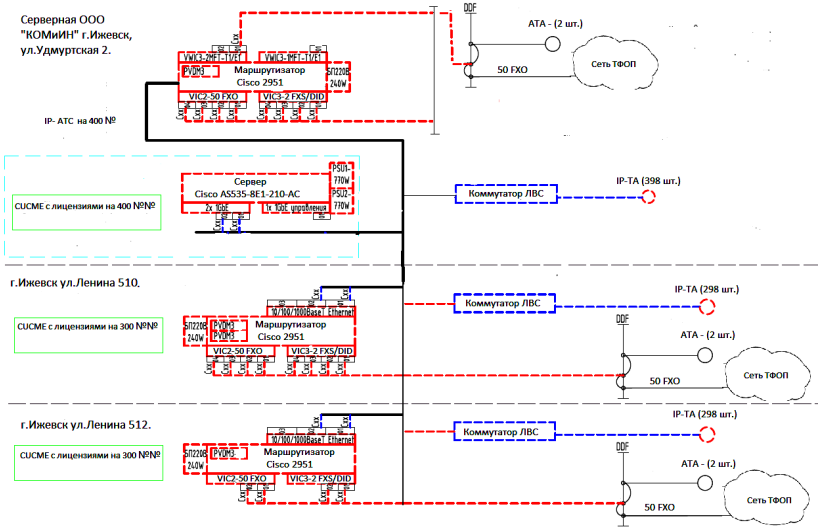


Рис. 14. Структурная схема цифровой корпоративной сети ООО «КОМиН»

Достоинства данной схемы:

– подходит для небольших удаленных офисов;

– настройка телефонной системой находится в главном офисе;

– доступ удаленных офисов, ко всем сервисам телефонии (голосовая почта, обработка сообщений, телефонные справочники);

– передача данных и установление телефонных соединений между удаленными офисами, является внутренним ресурсом;

– нет необходимости нанимать персонал технической поддержки для каждого удаленного офиса.

В двух производственных зданиях подключили по 298 цифровых пользователей и 2 аналоговых. Для обеспечения бесперебойной работы телефонной сети были приобретены источники бесперебойного питания.

Выводы

В работе рассмотрены особенности проектирования цифровой корпоративной телефонной сети на примере сети компании ООО «КОМиИН», в офисах которой насчитывает около тысячи человек, и расположены они в нескольких удаленных друг от друга зданиях. Рассмотрены протоколы, используемые при построении корпоративных телефонных сетей. Выявлено, что наиболее для этого подходит протокол SIP. Подобрано оборудование, необходимое для построения подобных сетей.

Список литературы

1. *Гольдштейн*, *Б. С*. Конвергенция мобильных и интеллектуальных сетей / Б. С. Гольдштейн, И. М. Ехриель, Р. Д. Рерле // Вестник связи. – 2000. – № 4. – С. 15–25.

2. *Королькова*, *С. Е.* Расчет и оптимизация сетей с динамической маршрутизацией // Тез. докл. на LVII научной сессии, посвященной Дню радио. – Т. 2. – М. : РНТОРЭС им. А. С. Попова, 2002. – С. 236–237.

3. *Панов*, *А. Е.* Анализ возможностей АТМ-технологии для коммутации и высокоскоростной передачи данных : тез. докл. на науч.-техн. конф. проф.-преп. сост. МТУСИ, 2002.

4. *Шринивас*, *Вегешна*. Качество обслуживания в сетях IP. Основополагающие принципы реализации функций качества обслуживания в сетях Cisco. / пер. с англ. – М. : Вильямс, 2003. – 368 с.

Features a Selection of Equipment in the Organization of Corporate Networks between Multiple Remote Sites

In operation the situation of design of a digital corporate telephone network of the OOO KOMIIN company is considered. The choice of a digital network is caused by universality of use of such networks, also because of aspiration of transition to completely digital networks. Development of telephone networks using the IP telephony will allow to reduce payment of telephone negotiations and costs of maintenance of infrastructure. In the development plan for the IP telephony creation of one technical platform allowing to connect the available decisions for transmission and obtaining voice information which can be used in business processes is.

Keywords: corporate; IP telephony; network; remote objects; equipment

УДК 681.3.014

М. А. Бояршинов, кандидат технических наук
E-mail: mabkb@istu.ru
О. М. Шабалина, студентка
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Сравнение энергетической эффективности от выбранного вида фазовой манипуляции в подканале

Рассматриваются сложные составные многоканальные сигналы. Приведена оценка энергетической эффективности при использовании в подканалах сигналов ФМ-2, а также М-ичных фазоманипулированных сигналов (ФМ-4 и ФМ-8) при подаче в каждый подканал детерминированной последовательности данных и при различных параметрах.

Ключевые слова: анализ; энергетическая эффективность; многоканальный сигнал, моделирование; пик-фактор

В настоящее время в связи с развитием элементной базы все больше внимания уделяется сложным многоканальным сигналам, которые позволяют эффективно адаптироваться к условиям связи, обеспечивают защиту от помех и имеют ряд других достоинств. Одним из препятствий для широкого применения таких сигналов, особенно в маломощных передатчиках, является ухудшение пик – фактора, по сравнению с одноканальными сигналами, который характеризует энергетическую эффективность сигнала [1].

В статье рассматриваются многоканальные сигналы с использованием в подканалах двоичных фазоманипулированных сигналов (ФМ-2), а также *М*-ичные фазоманипулированные сигналы ФМ-4 и ФМ-8. Приведены значения пик-факторов для несущей частоты 20 МГц с разнесением подканалов на 4 кГц. Моделирование проводилось в среде *Matlab*.

В работе получен сложный составной широкополосный сигнал из суммы узкополосных. Этот метод в какой-то мере используется также в *OFDM*. Раньше данному методу не уделялось столь большого внимания, т. к. сложно было произвести обработку сигнала из-за слабой элементной базы, поэтому приходилось объединять сигналы в канал от разных источников. В настоящее время возможности для обработки сигнала растут, и, как следствие, внимание к многоканальным сигна-

© Бояршинов М. А., Шабалина О. М., 2017

лам увеличивается и принять сложный составной сигнал даже в портативной аппаратуре уже не проблема, хотя на передающем конце существует проблема объединения сигнала в один из-за возникновения комбинационных составляющих, если не обеспечена линейность трактов во всем динамическом диапазоне. Также может быть влияние подканала на подканал и наблюдаться снижение энергетической эффективности системы из-за ухудшения пик-фактора [2, 3]. Поэтому в данной работе мы рассмотрим, на сколько ухудшается пик-фактор сложного составного сигнала из группы узкополосных и как проявляются нежелательные эффекты.

Результаты моделирования для указанных выше несущей частоты и разноса подканалов приведены в табл. 1–6.

Таблица 1. **Значения пик-факторов одноканального ФМ-2 при скорости передачи информации 150 бит/с**

До фильтрации подканалов	Пик-фактор, дБ				После фильтрации подканалов	Пик-фактор, дБ			
	1	2	4	8		1	2	4	8
1 канал	3	3	3	3	1 канал	5,78	5,74	5,71	5,7
2 канала	6	6	6	6	2 канала	8	7,9	7,87	7,86
4 канала	9	9	9	9	4 канала	12,53	12,51	12,5	12,48
8 каналов	12	12	12	12	8 каналов	13,86	13,8	13,77	13,76
16 каналов	15	15	15	15	16 каналов	16,25	16	15,8	15,76

Таблица 2. **Значения пик-факторов одноканального ФМ-2 при скорости передачи информации 2400 бит/с**

До фильтрации подканалов	Пик-фактор, дБ				После фильтрации подканалов	Пик-фактор, дБ			
	1	2	4	8		1	2	4	8
1 канал	3	3	3	3	1 канал	8,12	8,11	8,1	8
2 канала	6	6	6	6	2 канала	10,4	10,35	10,34	10,3
4 канала	9	9	9	9	4 канала	12,7	12,69	12,68	12,66
8 каналов	12	12	12	12	8 каналов	16	15,97	15,96	15,9
16 каналов	15	15	15	15	16 каналов	19,2	19,18	19,15	19,13

Таблица 3. **Значения пик-факторов одноканального ФМ-4 при скорости передачи информации 150 бит/с**

До фильтрации подканалов	Пик-фактор, дБ				После фильтрации подканалов	Пик-фактор, дБ			
	1	2	4	8		1	2	4	8
1 канал	3	3	3	3	1 канал	4,8	4,76	4,74	4,73
2 канала	6	6	6	6	2 канала	7,64	7,63	7,62	7,6
4 канала	9	9	9	9	4 канала	10,63	10,6	10,59	10,5
8 каналов	12	12	12	12	8 каналов	13,52	13,5	13,49	13,48
16 каналов	15	15	15	15	16 каналов	16,2	16,18	16,15	16,12

Таблица 4. **Значения пик-факторов одноканального ФМ-4 при скорости передачи информации 2400 бит/с**

До фильтрации подканалов	Пик-фактор, дБ				После фильтрации подканалов	Пик-фактор, дБ			
	1	2	4	8		1	2	4	8
1 канал	3	3	3	3	1 канал	7,9	7,7	7,57	7,5
2 канала	6	6	6	6	2 канала	9,8	9,61	9,44	9,3
4 канала	9	9	9	9	4 канала	12,3	12,15	12,1	12,07
8 каналов	12	12	12	12	8 каналов	15,9	15,57	15,36	15,15
16 каналов	15	15	15	15	16 каналов	18,4	18,18	17,9	17,8

Таблица 5. **Значения пик-факторов одноканального ФМ-8 при скорости передачи информации 150 бит/с**

До фильтрации подканалов	Пик-фактор, дБ				После фильтрации подканалов	Пик-фактор, дБ			
	1	2	4	8		1	2	4	8
1 канал	3	3	3	3	1канал	4,35	4,34	4,33	4,3
2 канала	6	6	6	6	2 канала	7,2	7,16	7,12	7,1
4 канала	9	9	9	9	4 канала	9,8	9,79	9,65	9,63
8 каналов	12	12	12	12	8 каналов	12,69	12,63	12,62	12,6
16 каналов	15	15	15	15	16 каналов	16	15,8	15,7	15,56

Таблица 6. **Значения пик-факторов одноканального ФМ-8 при скорости передачи информации 2400 бит/с**

До фильтрации подканалов	Пик-фактор, дБ				После фильтрации подканалов	Пик-фактор, дБ			
	1	2	4	8		1	2	4	8
1 канал	3	3	3	3	1 канал	7	6,85	6,7	6,6
2 канала	6	6	6	6	2 канала	9,4	9,15	9	8,9
4 канала	9	9	9	9	4 канала	12,2	12,07	11,95	11,79
8 каналов	12	12	12	12	8 каналов	15,5	15,27	15,06	14,9
16 каналов	15	15	15	15	16 каналов	16,5	16,38	16,25	16,14

Таким образом, в результате анализа можно сделать следующие выводы:

– при увеличении числа разрешенных канальных символов в фазоманипулированных сигналах, пик-фактор сигналов становится меньше;

– увеличение скорости в подканале приводит к росту пик-фактора, что понижает энергетическую эффективность радиолинии;

– после фильтрации сигналов в подканалах также наблюдается рост пик-фактора;

– изменение длительности канального символа при детерминированной последовательности данных в подканале в выбранном диапазоне значений практически не влияет на пик-фактор;

– при увеличении числа подканалов пик-фактор сигнала также увеличивается, что ведет к неэффективной работе системы, однако передача по нескольким подканалам позволяет адаптироваться к условиям связи и повысить скорость передачи информации. При этом передача разнородной информации по подканалам имеет недостатки – падает помехоустойчивость передачи в подканале. Для получения меньшей вероятности ошибки необходимо применять адаптивные алгоритмы (сокращать число подканалов при плохих условиях передачи, убирать плохие подканалы, уменьшать скорость передачи, увеличивать разнос между подканалами) [3].

Таким образом, в результате работы проведена оценка пик-факторов и выработаны рекомендации по выбору рабочих параметров при организации передачи сигнала по нескольким подканалам.

Список литературы

1. Принципы построения многоканальных систем передачи // Студопедия. – URL: http://studopedia.su/11_39328_tema--printsipi-postroeniya-mnogokanalnih-sistem-peredachi.html (дата обращения: 29.10.2016).

2. *Прокис*, *Дж.* Цифровая связь / пер. с англ. ; под ред. Д. Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.

3. *Голдсмит*, *А.* Беспроводные коммутации. – М. : Техносфера, 2011. – 904 с.

Comparison of the Energy Efficiency from the Selected Species in the Sub-Channel Phase-Shift Keying

The article deals with complex composite multi-channel signals. The estimation of energy efficiency when used subchannels FM signals – 2 and M-ary PSK signal (FM-4 and FM-8) feeding each subchannel sequences and deterministic data at different parameters.

Keywords: analysis; energy efficiency; multi-channel signal simulation; the peak-factor

УДК 621.396.93

А. М. Воробьев, руководитель службы по эксплуатации сети
Центрального региона ПАО «ВымпелКом»
А. А. Мальцева, студент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Модернизация сети сотовой связи стандарта 3G в СЦ «Азбука ремонта»

Идея данной работы заключается в улучшении радиопокрытия в одном из строительных центров нашего города. В данной работе выбран модернизируемый фрагмент сети, таким стал СЦ «Азбука Ремонта» на ул. Молодежной, д. 107б. В рамках работы рассчитаны основные параметры для проведения моделирования в бесплатной программной среде. Целью проекта является и выбор подходящего оборудования, и план его размещения. Произведен расчет санитарно-защитных зон и зон ограничения застройки.

Ключевые слова: 3G; UMTS; технология, стандарт; поколение; радиопокрытие

В настоящее время несмотря на широкое развитие современных технологий и устройств очень важной и волнующей проблемой является недостаточно хорошее качество связи. Данная проблема касается не только отдаленных уголков нашей страны, но и жителей крупных городов.

На сегодняшний день в городах присутствует множество высотных зданий и сооружений, достаточное количество зеленых насаждений, а также других препятствий. Все эти условия затрудняют обеспечение хорошей мобильной связи.

Каждый из нас сталкивался с проблемой плохой сотовой связи, посещая торговые комплексы и строительные центры. Зачастую мы, набирая понравившиеся нам товары, продукты или материалы, желаем связаться с близкими и друзьями для того, чтобы получить совет, и во многих случаях эти попытки терпят неудачу. Многие жители мегаполисов используют online-программы для подбора каких-либо материалов для ремонта. Качественная связь в таких помещениях необходима. Плохое и вовсе отсутствующее покрытие обусловливается толстыми бетонными стенами и железными перекрытиями, отсутствием окон, нахождением в подземных помещениях или удаленным размещением

© Воробьев А. М., Мальцева А. А., 2017

от базовых станций сотовых операторов. Все это превращается в фактически непреодолимый барьер для сигнала, который излучается оператором сотовой связи с заданной мощностью, превышать которую он не имеет права.

В настоящее время пользователям необходим все тот же хорошо знакомый мобильный интернет, но гораздо более быстрый и надежный. Таким является 3G-интернет.

Стандарт 2G не мог обеспечить необходимую скорость передачи данных. Поэтому к мобильному Интернету нового поколения предъявлено главное требование – это высокая скорость передачи данных. 3G-интернет решил эту задачу, снял ограничения и открыл новые возможности для своих пользователей.

Цель данной работы заключается в улучшение радиопокрытия в одном из торговых центров г. Ижевска. В рамках проекта планируется выбор модернизируемого фрагмента сети, рассчет основных параметров для проведения моделирования в бесплатной программной среде. Немаловажной задачей проекта является и выбор подходящего оборудования, а также план его размещения. Затем следует рассчитать санитарно-защитные зоны.

Для данного проекта был выбран строительный центр «Азбука ремонта» в г. Ижевске, ул. Молодежная, д. 107б. Вблизи СЦ «Азбука ремонта» располагаются две точки с базовыми станциями всех четырех операторов сотовой связи.

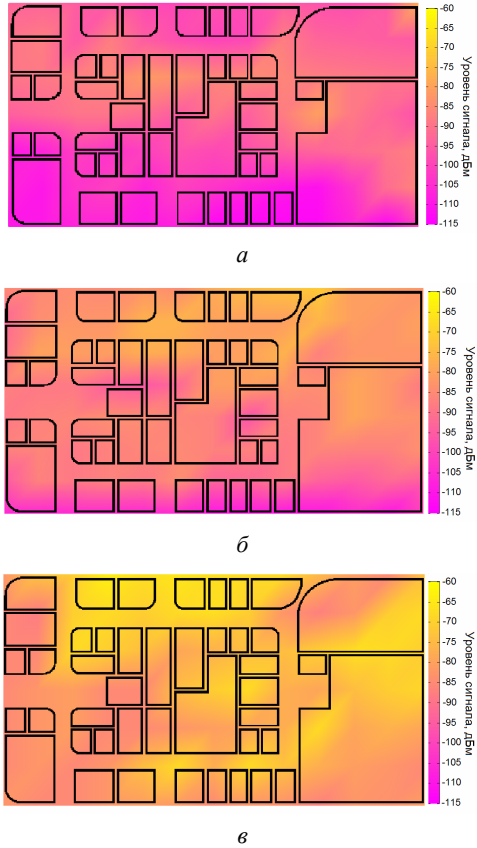
Помещение имеет 3 этажа. На каждом из них был замерен уровень сигнала при помощи программы *Netmonitoring*. Далее по полученным значениям в программе *Matlab* была смоделирована карта покрытия каждого этажа. Результаты показаны на рис. 1.

Несущие стены и перекрытия в данном помещении выполнены из железобетонных конструкций. Здание имеет 3 этажа, часть крыши выполнена из стекла, поэтому на третьем этаже покрытие уверенное, на втором – приемлемое, а на первом этаже связь практически отсутствует. Уровня сигнала, который обеспечивают близлежащие базовые станции достаточно для покрытия 2-го и 3-го этажей, но недостаточно для 1-го этажа. Проанализировав карту радиопокрытия, можно отметить что «белые зоны» имеются в основном на 1-мм этаже, именно поэтому проект будет разработан для 1-го этажа.

Данная работа подразумевает установку базовой станции в помещение и дальнейшее ее подключение к существующей базовой станции.

По результатам расчетов максимальный продольный размер зоны радиопокрытия, соответствующий наличию условий прямой видимости и оптимальной взаимной ориентации базовой и абонентской ан-

тенн, в рассматриваемом случае составляет приблизительно 20 м. Антенны предполагается устанавливать в коридоре. Территория, не попавшая в зону обслуживания одной антенны, будет покрыта следующей.



а

б

в

Рис. 1. Карты радиопокрытия СЦ «Азбука ремонта»:
1-й этаж (*а*); 2-й этаж (*б*); 3-й этаж (*в*)

Для осуществления моделирования радиопокрытия сети стандарта UMTS в помещении, был выбран инструмент Wi-Fi Planer [1]. Технология Wi-Fi работает на несущей частоте 2,4 ГГц, а технология UMTS – на несущей частоте 2,1 ГГц. Следовательно, данная программа является наиболее подходящей для моделирования.

Результаты моделирования показаны на рис. 2.

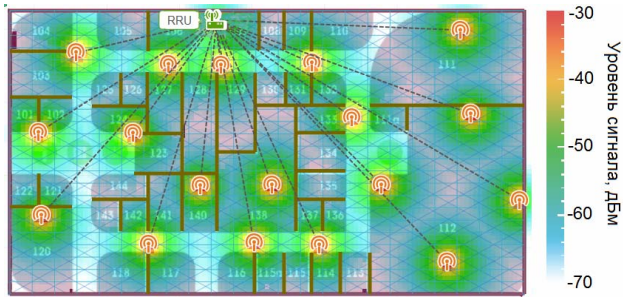


Рис. 2. Результаты моделирования радиопокрытия

Моделирование показало, что для уверенного радиопокрытия необходимо установить в помещении 18 антенн. По расчетам радиус действия одной антенны составил 20 м, в результате моделирования данное значение также близко к 20 м.

Выбор оборудования является важной частью проектирования сети, потому что именно с использованием оборудования сеть и становится сетью. Также от характеристик оборудования зависят параметры сети: скорость передачи данных, качество связи, дальность связи и т. д.

В работе было выяснено, что при проектировании сети технологии UMTS необходимо такое оборудование, как базовая станция (Huawei DBS3900 [2]), антенны (Nitsa-1 [3]), соединительные фидеры.

Подключение основных блоков показано на рис. 3.

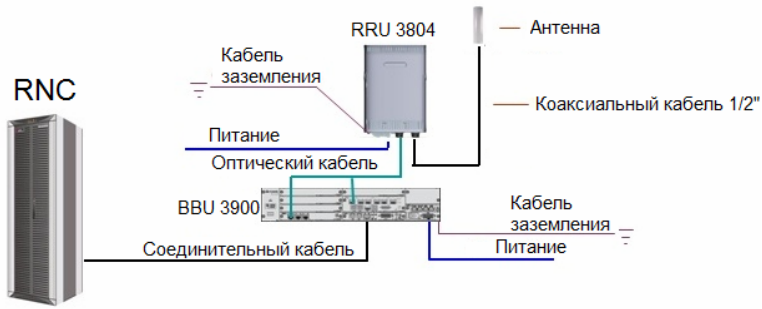


Рис. 3. Схема подключения основных блоков

Антенны соединяются с RRU коаксиальными кабелями [4]. Блоки RRU размещаются на стенах помещения, вблизи антенн. Блоки RRU соединяются с BBU оптическим кабелем.

BBU размещается в аппаратной, и на участке BBU-RRU потери сводятся к нулю, т. к. соединяются по оптическому кабелю. BBU соединяется с любым транспортным оборудованием (мультиплексор, РРЛ) и далее до контроллера базовых станций.

В данном проекте можно рассмотреть два варианта размещения оборудования в помещении СЦ «Азбука ремонта».

Первый вариант подразумевает установку блока базовой станции BBU в уже имеющейся серверном помещения, а блока RRU – на стену в одном из коридоров помещения для уменьшения затухания сигнала в коаксиальном кабеле. Все антенны, размещенные в помещении, будут присоединяться к блоку RRU с использованием сплиттеров.

Второй вариант – аренда помещения для оборудования собственной аппаратной. При этом нужно учесть затраты на систему кондиционирования, систему пожаротушения, источник бесперебойного питания, аккумулятор, систему сигнализации, а также стойку для оборудования и ящик для документации. Блоки RRU и BBU устанавливаются аналогично предыдущему случаю.

Целесообразно выбрать размещение оборудование в уже имеющемся серверном помещении, т. к. это уменьшит затраты на установку дополнительного оборудования. Общий план размещения оборудования в помещении представлен на рис. 4.

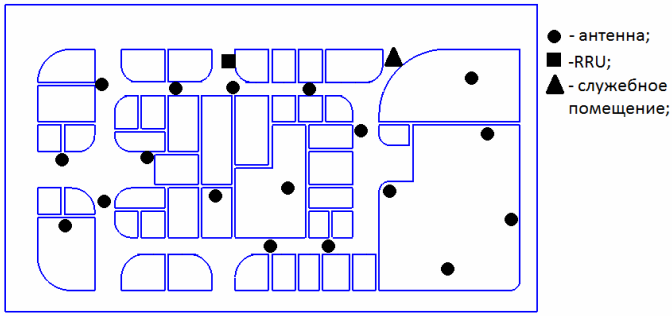


Рис. 4. Общий план размещения оборудования в СЦ «Азбука ремонта»

В целях защиты населения от воздействия электромагнитных излучений радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ), создаваемых ПРТО, устанавливаются санитарно-защитные зоны и зоны ограничения застройки.

В результате вычислений граница ССЗ по предельно допустимому уровню (10 мкВт/см^2) в направлении максимума ДН составит R = 1,43 м. Наглядно ССЗ представлена на рис. 5.

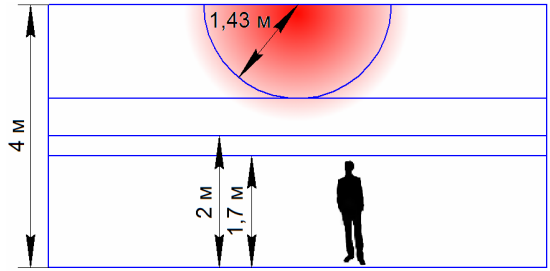


Рис. 5. Представление ССЗ

Результаты расчетов и построений показывают: СЗЗ от работы приемо-передающих антенн отсутствует, т. к. высота подвеса антенн составляет 4 м. Поскольку антенны расположены на высоте 4 м, а максимальный радиус опасной зоны не превышает 2 м, специальных мер по организации СЗЗ и ЗОЗ не требуется.

Выводы

Санитарно-защитная зона равна 1,43 м, расстояние от уровня пола до ССЗ составляет 2,57 м, следовательно, излучения не оказывают негативного влияния на состояние и здоровья человека в целом.

Работа проектируемой системы не создает опасности для здоровья населения и обслуживающего персонала на прилегающей к ПРТО территории, поскольку уровни ЭМИ РЧ в местах возможного их нахождения будут существенно ниже допустимых норм.

Вредные выбросы от технологического оборудования отсутствуют. Это позволяет сделать вывод о безопасности оборудования проектируемой сети.

В настоящее время беспроводные сети технологии UMTS получают все более широкое распространение вследствие того, что пользователи нуждаются в быстрой и качественной передаче данных из любого места их нахождения, используя сеть Интернет. Одним из главных преимуществ таких сетей является удобство в подключении устройств.

Разработка и проектирование такой сети связи является важной задачей. В правильно разработанной и сконструированной сети она работает быстро и эффективно.

Список литературы

1. Wi-Fi Planer. PRO // D-Link. – URL: http://www.dlink.ru/tools/wi-fi/#wfp (дата обращения: 17.11.2016).

2. Huawei Technologies DBS3900 // mforum.ru. – URL: http://www.mforum.ru/093185.htm (дата обращения: 17.11.2016).

3. Nitsa-1 – офисная потолочная антенна диапазонов GSM, Wi-Fi, 3G, 4G // Антекс – Антенны для любой связи. – URL: http://antex-e.ru/store/34760/ (дата обращения: 21.05.2016).

4. DRAKA NK CABLE кабель ВЧ 50 Ом фидер RFA 1/2" // itservis.in.ua. – URL: http://itservis.in.ua/produktsiya/item/8-kabel-koaksialnyj/77-draka-nk-cable-kabel-vch-50-om-fider-rfa-1-2.html (дата обращения: 20.11.2016).

Modernization of a Cellular Network of the UMTS Standard

The idea of this work is to improve the coverage in one of the building of our city centers. In this paper, selected modernized legal for trade-network fragment, thus became SC "ABC Repair" on the street. Youth, d. 107B. Also as part of the work to calculate the main parameters for the simulation in the free software environment. The aim of the project is the selection of suitable equipment and its deployment plan. Then we calculated the sanitary protection zones and limit development.

Keywords: 3G; UMTS; technology; standard generation radio coverage

УДК 621.396.13

А. С. Ворсина, студент
E-mail: vorsina2009@yandex.ru
Р. И. Шигапов, студент
E-mail: ramilshigapov@mail.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Сравнение вариантов синтеза частот в приемопередающих трактах в диапазоне до 300 МГц

Рассматривается работа приемопередающих трактов с разными синтезами частоты. Актуальность данного проекта заключается в том, что ранее использовался синтез на основе фазовой автоподстройки частоты, а сейчас более популярен цифровой синтез.

Ключевые слова: цифровой синтез; ФАПЧ; синтезатор; спектр; частота

Под термином «синтезатор частоты» понимают электронное устройство, способное из опорной частоты получать на выходе требуемую частоту или набор частот согласно управляющим сигналам. Наиболее распространенными являются следующие методы синтеза частот:

– гибридный синтез;

– косвенный *(indirect*) синтез на основе фазовой подстройки частоты (*Phase Locked Loop – PLL*);

– прямой цифровой синтез (*Direct Digital Synthesis – DDS*);

– прямой аналоговый синтез (*Direct Analog Synthesis – DAS*).

У каждого из перечисленных методов синтеза частот есть свои плюсы и минусы, соответственно для каждого случая необходимо делать выбор, основанный на требованиях, предъявляемых к устройству. Основные параметры, определяющие качество синтезатора частоты:

– чистота спектра выходного сигнала (уровень побочных компонентов и уровень шума);

– диапазон перестройки (полоса частот выходного сигнала);

– скорость перестройки;

– частотное разрешение;

– количество разных генерируемых частот;

– гибкость (возможность осуществления различных видов модуляции);

– неразрывность фазы выходного сигнала при перестройке.

© Ворсина А. С., Шигапов Р. И., 2017

Прямой аналоговый синтез

Название данного метода связано с тем, что отсутствует процесс коррекции ошибки, а значит, качество выходного сигнала напрямую зависит от качества опорного сигнала и фазовый шум такого синтезатора достаточно низкий [1]. Одним из главных преимуществ данного синтеза является то, что можно вернуться на любую частоту и продолжить работать в той же фазе, в которой бы и остались, без осуществления перехода. Такое свойство данного синтеза называют «фазовой памятью». Используя сразу несколько опорных генераторов можно обеспечить перестройку по частоте. Такой способ применяют, для радиостанций с малым количеством каналов. Но если требуется обеспечить широкие возможности перестройки по частоте, то понадобится слишком много опорных генераторов, а это весьма дорогостоящее решение проблемы.

Косвенный синтез частоты на основе фазовой автоподстройки

Такой метод синтеза основан на сравнении частоты и фазы выходного сигнала, который образуется опорным генератором, с напряжением V_{CO}. Структурная схема косвенного синтезатора изображена на рис. 1 [1]. Фазовый детектор, работающий на определенной частоте F_C (частота сравнения), находит ошибку. Частота F_C получается путем деления на N частоты опорного генератора G. Вначале частота выходного сигнала делится на M, а потом сравнивается с частотой F_C. В том случае, если частота отклоняется, то обнаруженная ошибка начинает изменять управляющее напряжение V_{CO}, тем самым уменьшая само отклонение.

Шаг частотной сетки такого синтезатора определяет частота сравнения, это объясняется тем, что делители частоты имеют целочисленные коэффициенты деления. Определим выходную частоту:

$$F_{OUT} = F_C \cdot M = \frac{F_{CLK}}{N} \cdot M = F_{CLK} \cdot \frac{N}{M}, \qquad (1.1)$$

где F_{OUT} – выходная частота; F_C – частота сравнения; F_{CLK} – тактовая частота; N – коэффициент деления опорной частоты; M – коэффициент деления выходной частоты.

Тем самым, *PLL* синтезатор умножает опорную частоту в N/M раз. Коэффициенты N и M могут задаваться микроконтроллером, но в основном число N при перестройке меняют редко, поскольку это способствует изменению частоты сравнения, а значит, становится необходимым изменение основных параметров петлевого фильтра.

Фазовый детектор образует дополнительные фазовые шумы. Чтобы получить малый шаг перестройки частоты, стараются работать на более низкой частоте сравнения, а для этого необходимо понизить частоту среза петлевого фильтра. Из-за этого фазового шума становится еще больше. В данной структуре очень сложно обеспечить быструю перестройку по частоте.

Существуют различные способы получения малого шага перестройки по частоте, например, такой как объединение в одном синтезаторе нескольких петель фазовой автоподстройки. Но тогда такой синтезатор становится весьма дорогим и сама конструкция увеличивается в размерах, а это делает его менее востребованным для производства.

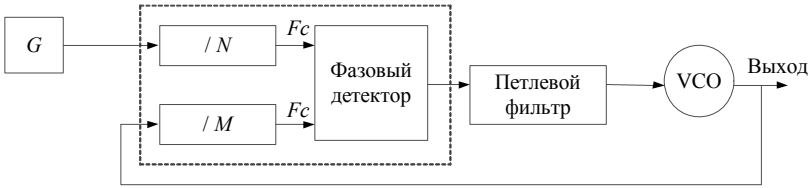


Рис. 1. Синтезатор частоты на основе *PLL*

Прямой цифровой синтез (*DDS*)

Прямой цифровой синтез считается сравнительно новым синтезом частот. Но на рынке уже появилось огромное количество недорогих микросхем полных *DDS*, что делает их интересными для различных областей применения.

Цифровые синтезаторы отличаются своей цифровой точностью и определенностью: создаваемый ими сигнал синтезируется со свойственной таким системам точностью. В любой момент времени можно точно знать частоту, амплитуду и фазу, а также контролировать их. Еще одним из немаловажных качеств цифрового синтезатора является то, что *DDS* практически не подвержены старению и температурному дрейфу. Благодаря всему вышеперечисленному *DDS* стремительно заменяют простые аналоговые синтезаторы частот.

Основные преимущества цифрового синтеза частот:

– цифровое управление фазой и частотой выходного сигнала;

– высокое разрешение по фазе и частоте;

– максимально быстрый переход на любую частоту (или фазу), перестройка по частоте без разрыва фазы и других аномалий, связанных с временем установления;

– структура, основанная на *DDS*, с минимальным шагом перестройки по частоте, делает необязательным применение точной подстройки опорной частоты, а также создает возможность параметрической температурной компенсации;

– микроконтроллерное управление легко организуется с помощью цифрового интерфейса;

– для квадратурных синтезаторов предусмотрены *DDS* с *I*- и *Q*-выходами, которые работают согласованно.

В устройстве синтезатор частоты является основой системы настройки, а значит, в основном определяет потребности данного устройства. Синтезатор *DDS* простой, высокоинтегрированный, небольших габаритов, все это делает его практически идеальным синтезатором как с технической, так и с экономической стороны. Еще можно подчеркнуть то, что многие параметры *DDS* программно-управляемые, следовательно, в устройство можно добавлять новые возможности. Сейчас в основном *DDS* используют субмикронную *CMOS*-технологию и корпуса малого размера. Параллельно этому постоянно уменьшается цена. Такие плюсы по сравнению с другими синтезаторами делают *DDS* очень перспективными приборами.

Главной задачей *DDS* является получение выходного сигнала синусоидальной формы с заданной частотой. Но так как в *DDS* выходной сигнал формируется в цифровом виде, появляется необходимость цифро-аналогового преобразования. Следовательно, в структуре *DDS* должен присутствовать ЦАП, а на его выходе должен присутствовать ФНЧ, который будет подавлять образы выходного спектра, повторяющиеся с периодичностью.

Чтобы получить синусоидальные сигналы на вход ЦАП, требуется подать последовательность отсчетов функции sin, следующих с частотой дискретизации. В связи с тем, что закон изменения функции sin во времени сложно осуществим и цифровыми методами не может быть реализован, то следует применить табличный метод формирования отсчетов функции sin.

Перекодировочная таблица в основном размещается в ПЗУ. Входной код, подаваемый на адресные входы ПЗУ, это и есть аргумент функции sin, а выходной код ПЗУ равен значению функции для данного аргумента. Фаза, аргумент, в отличие от значения функции, меняется во времени линейно.

Гораздо проще сформировать линейно меняющуюся во времени последовательность кодов, с этим может справиться простой двоичный счетчик. Основанный на таком счетчике простейший *DDS* показан на рис. 2 [1]: адрес для ПЗУ формирует двоичный счетчик, в него за-

писана таблица одного периода функции sin, на ЦАП поступают отсчеты с выхода ПЗУ, который формирует на выходе синусоидальный сигнал, подвергающийся фильтрации в ФНЧ и поступающий на выход. Делитель частоты с переменным коэффициентом деления используется для перестройки выходной частоты, на его вход поступает тактовый сигнал с опорного генератора.

Для данной работы была выбрана модель построения приемопередающего тракта [2] на основе 100-выводного микроконтроллера STM32F207LQFP100 [3] и цифрового синтезатора частоты 1508ПЛ8Т [4] (рис. 3).

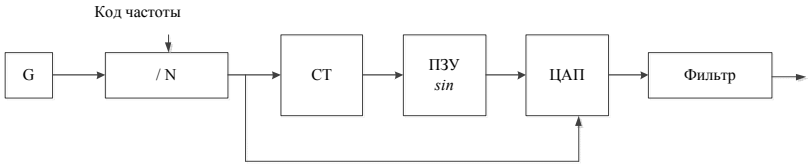


Рис. 2. Синтезатор частоты на основе *DDS*

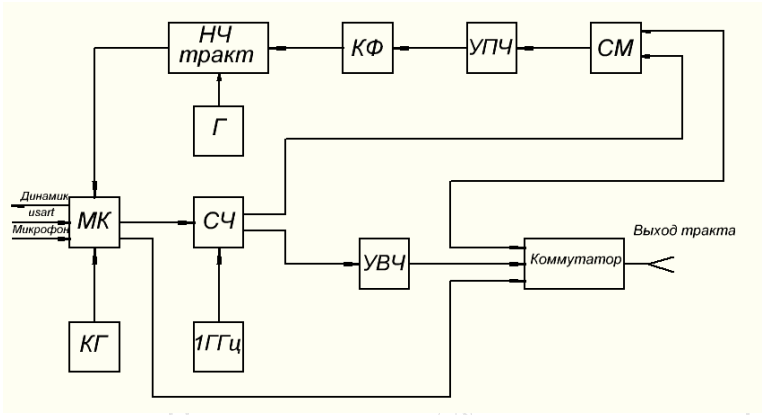


Рис. 3. Структурная схема блока приемопередающего тракта на основе микроконтроллера и *DDS*

Выводы

В ходе сравнения выявлены более существенные преимущества прямого цифрового синтеза частот, такие как быстрая перестройка по частоте, возможность точно контролировать и менять частоту, амплитуду и фазу сигнала, а также высокое разрешение по частоте.

Важными достоинствами полученной конструкции являются относительная простота и доступность используемых элементов, быстродействие и точность, что немаловажно в современных цифровых устройствах.

Список литературы

1. *Ридико*, *Л. И.* DDS: прямой цифровой синтез частоты // Компоненты и технологии. – 2001. – № 7. – С. 50–56.

2. *Сиверс*, *А. А*. Проектирование радиоприемных устройств. – М. : Сов. радио, 1976. – 480 с.

3. Reference manual. STM32F207xx. STMicroelectronics, 2016. – 182 с.

4. Техническая документация цифрового синтезатора 1508ПЛ8Т. – URL: http://multicore.ru/mc/data_sheets/Manual_DDS_1508PL8T_131212.pdf (дата обращения: 27.03.2017).

Compare of Frequency Synthesis Options in Transceiver Paths in the Range Up to 300 MHz

This article considers the work of the transceiver circuits with different synthesis frequencies. The relevance of this project lies in the fact that the previously used synthesis based on phase-locked loop, and is now more popular digital synthesis.

Keywords: digital synthesis; PLL; synthesizer; spectrum; frequency

УДК 621.865.8

Р. Ф. Гумиров, студент
E-mail: nimruzilx@ya.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Разработка блока ручного управления манипулятором с элементами автоматизации

Рассматривается автоматизация ручного управления манипулятором, выявлены технические недостатки существующих вариантов реализации и предложено техническое решение для их устранения, а также возможной автоматизации управления в целом.

Ключевые слова: манипулятор; датчики угла поворота; микроконтроллер; электродвигатели; управление

На сегодняшний день ручной труд все чаще заменяется различными автоматическими механизмами и системами. Связано это с большим желанием ускорить рабочий процесс, освободить человека от тяжелого вида труда, монотонной работы, различных рисков и травм. Для этого и были созданы такие инструменты комплексной механизации и автоматизации, как манипуляторы, позволяющие поднимать, перемещать и кантовать разнообразные объекты. Хотя манипуляторы и могут полностью заменить людей, но бывают случаи, когда необходим оператор, задача которого – управлять этим самым манипулятором. Связано это бывает с тем, что манипулятор не имеет определенной программы работы, либо время от времени требует ее непредвиденной переналадки. Исходя из этого возникает необходимость реализовать манипулятор с ручным управлением.

Для реализации ручного управления необходимо разработать блок, способный управлять электродвигателями составных частей манипулятора, которые приводят его в движение. Подобных блоков существует достаточное множество, однако они имеют определенные недостатки. Например, отсутствие остановки работы электродвигателей в крайних конечных положениях манипулятора, из-за чего электродвигатели начинают форсировать, т. е. работать на износ, что отрицательно сказывается на приводах, составные части могут начать изнашиваться. К недостаткам можно отнести отсутствие функций, позволяющих упростить и автоматизировать работу: во-первых, автоматическая

© Гумиров Р. Ф., 2017

уборка манипулятора в исходное положение при завершении работы, во-вторых, сохранение положения манипулятора и воспроизведение его по команде оператора, что позволило бы значительно упростить и ускорить процесс работы, а также ситуативно задать собственную программу работы.

Разработана и предложена следующая структурная схема реализации (рис. 1). В состав манипулятора вводятся датчики крайнего положения и датчики угла поворота с целью остановки работы электродвигателей в крайних положениях манипулятора, реализации автоматической уборки и определения текущего положения составных частей манипулятора.

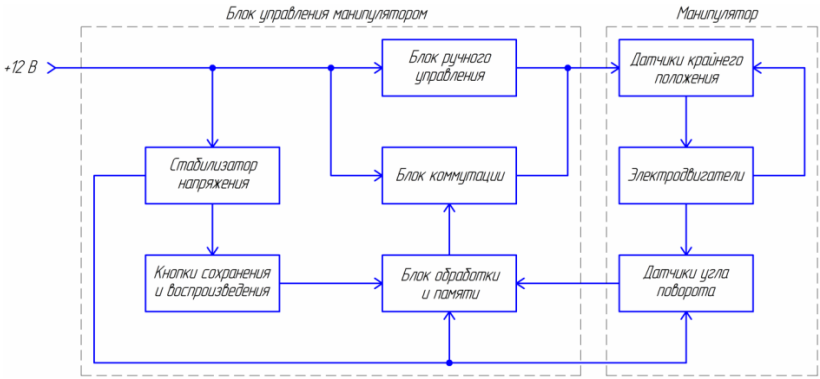


Рис. 1. Структурная схема

Блок управления манипулятором состоит из 5 внутренних блоков – субблоков. Основным является блок ручного управления, с помощью которого оператор может вывести манипулятор в любое произвольное положение. Стабилизатор напряжения обеспечивает питание для блоков с меньшим потреблением. Связка трех остальных блоков обеспечивает реализацию функций сохранения и воспроизведения положения манипулятора, ключевым из которых является блок обработки и памяти. Его роль занимает микроконтроллер, производящий обработку данных с датчиков угла поворота и выполняющий команды оператора, поступающие через кнопки сохранения и воспроизведения. Блок коммутации является параллельной цепью питания электродвигателей, коммутируемый управляющими сигналами микроконтроллера при воспроизведении манипулятора в одну из сохраненных положений.

Основная часть работы микроконтроллера заключается в обработке информации с выходов датчиков угла поворота в виде меандров [1] (рис. 2).

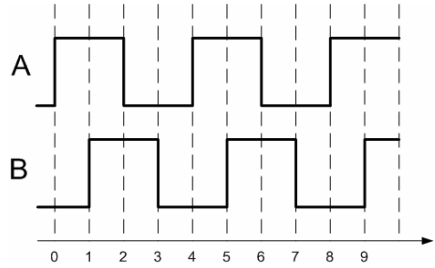


Рис. 2. Форма сигналов A и B с инкрементального энкодера

По этим менадрам микроконтроллер определяет в какую сторону и на сколько совершает вращение тот или иной электродвигатель, тем самым определяя местоположение составной части. Для оперативной обработки такой информации (фиксирования микроконтроллером подъема фронта A и параллельной проверке значения B) применяются функции, вызываемые по прерыванию (рис. 3).

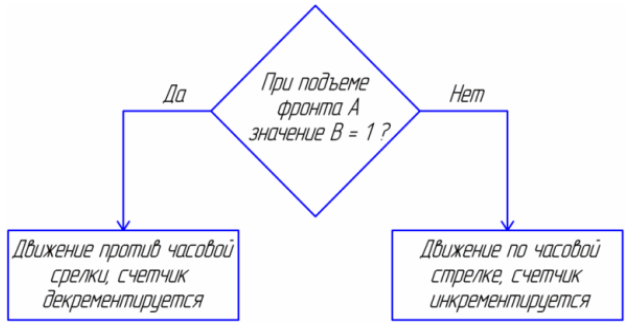


Рис. 3. Алгоритм подсчета импульсов при движении «плеча» или «предплечья» манипулятора

Остальными задачами микроконтроллера являются сохранение данных, их сравнение и подача управляющих сигналов в блок коммутации для воспроизведения положения манипулятора.

Разработана принципиальная схема блока управления. Основным элементом ручного управления является джойстик, коммутирующий

цепь питания с электродвигателями. Блок коммутации как параллельная цепь питания представляет собой набор ключей, реализованных на полевых транзисторах, которыми управляет микроконтроллер. Для питания микроконтроллера и кнопок применяется стабилизатор напряжения. При завершении работы и переводе тумблера в позицию выключения, питание переходит в отдельную цепь, которая проходит через датчики крайнего положения в манипуляторе и возвращает его в исходное положение.

Вывод

В результате научно-исследовательской работы был разработан блок управления манипулятором, позволяющий автоматизировать процесс работы за счет полезных функциональных возможностей, таких как сохранение и воспроизведение положения манипулятора, автоматическая уборка в исходное положение, остановка работы электродвигателей в крайних конечных положениях манипулятора. Данная разработка может быть применена в различных отраслях, где требуются манипуляторы без автоматического режима работы.

Список литературы

1. Устройства и процедуры обработки данных // Клуб программистов Весельчак.У. – URL: http://club.shelek.ru/viewart.php?id=369 (дата обращения: 30.10.2016).

2. *Конюх*, *В. Л.* Основы робототехники. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 288 с.

3. *Подкин*, *Ю. Г.* Алгоритмы учебного и научного поиска : электрон. учеб. пособие. – Сарапул : СПИ ИжГТУ, 2014. – 108 с.

4. *Муромцев*, *Д. Ю.* Конструирование узлов и устройств электронных средств : учеб. пособие // Д. Ю. Муромцев, И. В. Тюрин, О. А. Белоусов. – Ростов н/Д: Феникс, 2013. – 540 с.

Development of a Block for Manual Manipulator Control with Elements of Automation

The article deals with the automation of manual control of manipulator, revealed technical shortcomings of the existing embodiments and suggested technical solutions to address them, as well as possible the automation of management in general.

Keywords: manipulator; sensors of the rotation angle; microcontroller; motors; controls

УДК 004.31

Ф. М. Ермаков, студент
К. А. Зырянов, студент
А. Н. Копысов, кандидат технических наук, доцент
Р. А. Хатбуллин, кандидат технических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
К. А. Мерзляков, директор ООО «ИРЗ ТЕСТ»

Тестирование цифровых микросхем и подготовка стендового оборудования для измерения параметров

Рассматривается способ тестирования цифровых микросхем. В ходе подготовки к тестированию используется программное обеспечение, а именно AltiumDesigner для создания переходной платы. Используя Datasheet, определяются допуски необходимых параметров для измерения. На основе этих данных производится настройка тестера. Если все измеряемые параметры соответствуют заявленным, микросхема проходит контроль.

Ключевые слова: тестирование микросхем; *AltiumDesigner, Formula 2k*; ETS-780; переходная плата

Первым этапом в тестировании микросхемы является анализ ее параметров. Обычно в качестве технической документации микросхемы используется *Datasheet*.

Анализируя все параметры микросхемы, такие как ее рабочие напряжения питания, логические уровни, реализуемые микросхемой логические функции, времена задержек, температурные зависимости и другие, выбираются ключевые значения. На основе этих ключевых значений далее производится тестирование микросхемы.

Ключевыми параметрами являются: напряжение питания, токи питания, выходные напряжения (логические уровни), выходные токи и т. п.

Важность (приоритетность) контроля и измерения тех или иных параметров в большинстве случаев определяются назначением устройств, где применяется микросхема, и условиями ее эксплуатации.

Следующим этапом является создание электрической принципиальной схемы. В качестве программного обеспечения для создания электрической схемы контроля и измерения параметров используется программа *AltiumDesigner*.

© Ермаков Ф. М., Зырянов К. А., Копысов А. Н., Хатбуллин Р. А., Мерзляков К. А., 2017

Исходя из технической документации и рекомендуемых схем измерений параметров создается электрическая принципиальная схема, по которой будет производиться тестирование микросхемы. Она обычно состоит из входного и выходного портов, адаптера для микросхемы, резисторов и конденсаторов. Пример схемы изображен на рис. 1. На этом рисунке видны входные порты по краям и адаптер в центре.

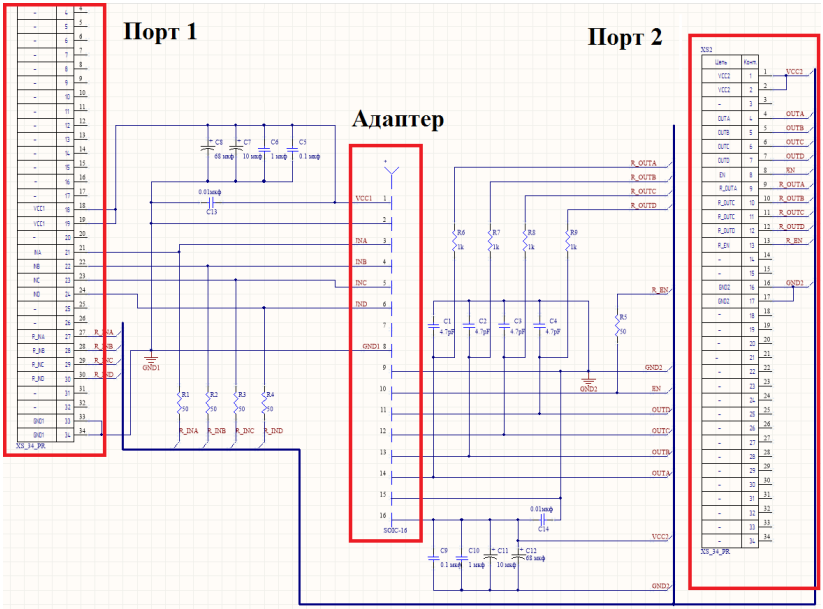


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная

После создания схемы электрической принципиальной, разрабатывается печатная плата адаптера. Ее разработка также проводится в программе *AltiumDesigner*. Она создается на основе уже созданной ранее схемы. После преобразований программы все элементы на печатную плату размещаются вручную в наиболее оптимальных местах. После этого производится автоматическая трассировка соединений.

Печатные платы обычно многослойные. Чаще всего это два слоя, а иногда и более. Пример печатной платы приведен на рис. 2. По краям расположены порты, а в центре платы – адаптер для микросхемы.

В дальнейшем выполняется изготовление печатной платы, монтаж радиоэлементов, контроль целостности сборки печатной платы. Гото-

вая плата адаптера используется при тестировании микросхемы. Пример платы адаптера приведен на рис. 2.

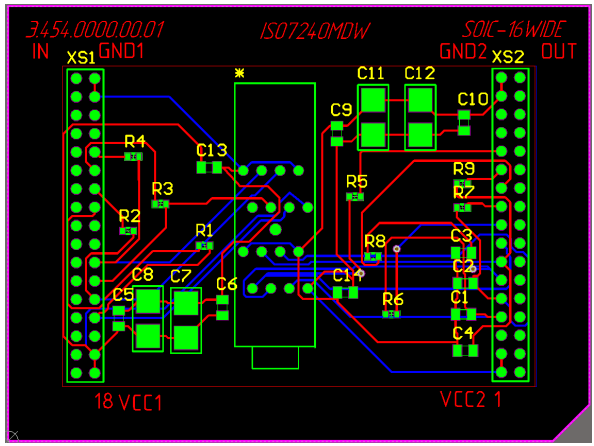


Рис. 2. Печатная плата

Платы адаптера при тестировании более сложных микросхем могут содержать активные микросхемы, реализующие дополнительные источники питания, элементы записи программ и иные функциональные элементы.

Далее для тестирования микросхемы необходимо определить допуска напряжений питания и логических уровней. Исходя из этих допусков выбираются наиболее жесткие условия тестирования, при которых микросхема может нормально функционировать. Для наглядности и удобства составляется таблица контроля параметров микросхемы для различных условий тестирования. Затем на основе этих данных программируется оборудование для тестирования.

Рассмотрим два варианта программирования оборудования для тестирования цифровых микросхем: FORMULA 2K и ETC-780.

Тестер FORMULA 2K предназначен для функционального и параметрического контроля цифровых микросхем произвольной (ТТЛ, КМОП и др.) и регулярной (ОЗУ) структуры, а также аналоговых и цифро-аналоговых микросхем.

Пакет специализированного программного обеспечения (ПО) тестера представляет собой совокупность программно-ориентированных средств, охватывающих весь спектр задач, которые возникают в связи с измерениями параметров БИС.

В ПО широко используются графические и табличные методы ввода и вывода информации, позволяющие быстро и наглядно оценивать результаты контроля.

Большая часть программных средств объединена в общую управляющую оболочку *Control 2K* (далее – Оболочка). Вызов различных модулей из оболочки производится независимо и позволяет наблюдать несколько одно*временно протекающих процессов.*

Язык SINOP является языком программирования высокого уровня с нефиксированным составом операторов, ориентированным на написание измерительных программ на тестере *FORMULA 2K*.

Данный язык имеет работает с латинскими буквами, арабскими цифрами, знаками операций, со служебными словами и т. д. Также использует такие типы данных, как вещественный, целочисленный, логический, строковый и перечисляемый, а также работает с массивами и множествами.

Измерительная программа на языке *SINOP* состоит из:

1. Заголовка,
2. Разделов описаний,
3. Раздела процедур,
4. Раздела операторов.

Редактор *SINOP* представляет собой инструментальную программную оболочку, способствующую повышению эффективности создания измерительной программы. Вид окна программы показан на рис. 3.

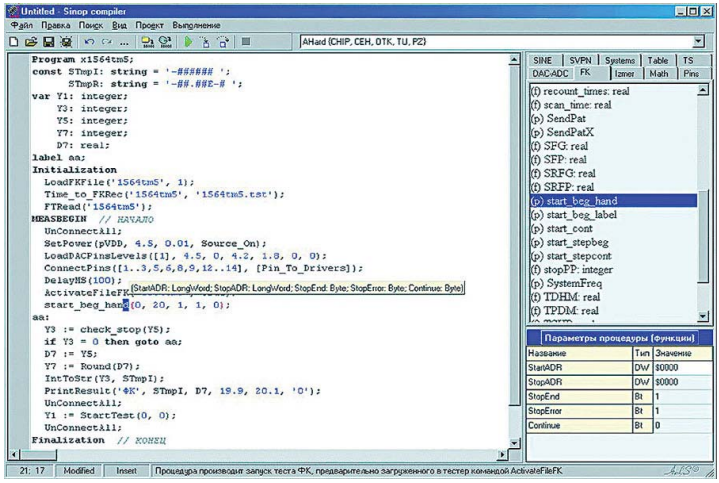


Рис. 3. Панель редактора

В состав редактора *SINOP* входят:

1. Текстовое меню для выбора и активизации опций среды *SINOP*.

2. Кнопочное меню, предназначенное для выбора и активизации основных опций среды.

3. Текстовое поле, в котором производится ввод и редактирование операторов языка.

4. Мастер подстановки операторов.

5. Строка состояния окна редактора.

Ход выполнения процесса компиляции отображается в четвертой секции строки состояния редактора.

Если в процессе компиляции возникли ошибки (либо предупреждения), дополнительно открывается панель сообщений компилятора. По завершении компиляции на жестком диске вычислительного блока тестера создается исполняемый файл с тем же именем и в той же директории, что и файл исходного текста.

Исполняемый файл содержит бинарный машинный код, полученный в результате компиляции, и служебную, необходимую информацию для загрузки и исполнения измерительной программы.

При каждом запуске измерительной программы в отладочном режиме (т. е. непосредственно из окна редактора *SINO*Р):

1. Код программы загружается в отладочный буфер.

2. Все переменные инициализируются нулями.

3. Типизированные константы инициализируются исходными значениями.

4. Выполняются последовательно все секции кода программы (Initialization, Measbegin и Finalization).

При каждом запуске измерительной программы в рабочем режиме (т. е. из оболочки *Contol F2K* при нажатии кнопки «Запуск измерений»):

1. Код программы загружается в буфер.

2. Производится инициализация переменных и констант (один раз).

3. Выполняется секция *Initialization*.

4. При нажатии на кнопку «Пуск» последовательно выполняются секции Measbegin и Finalization.

Тестер параметров цифровых интегральных микросхем ЕТС-780 применяется для высокопроизводительного функционального и параметрического контроля ТТЛ и КМОП микросхем с рабочей частотой последовательности функционального контроля до 48 МГц.

Тестер ЕТС-780 имеет возможность выполнять следующие виды измерений и исследований цифровых интегральных микросхем:

1. Измерение параметров ТТЛ и КМОП логики комбинационного и последовательного типа.

2. Измерение любой логики, памяти, с изменением пошагово параметров входных и выходных воздействий.

3. Измерение параметров микросхем памяти.

4. Измерение параметров микросхем контроллеров и процессоров.

Тестер представляет собой измерительно-вычислительный комплекс, в состав которого входят источники и измерители электрических сигналов, коммутационные устройства и управляющая ПЭВМ. Режимы работы комплекса устанавливаются пользователем с помощью программного обеспечения управляющей ПЭВМ.

Для тестирования на тестере ETC-780 необходимо сначала создать лист каналов измерения в текстовом формате ASCII, а также векторный файл. Пример приведен на рис. 4.

Лист каналов измерения

PinList for ISO7240MDW.txt

;SysCh	Pin#	Name	Grp	Type(IOBS)
1	3	INA	1	I
2	4	INB	1	I
3	5	INC	1	I
4	6	IND	1	I
5	14	OUTA	2	O
6	13	OUTA	2	O
7	12	OUTA	2	O
8	11	OUTA	2	O
9	7	EN	3	I

$End

Векторный файл

```
$Q
$B binary
$O   1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18
; without comments
$F
      IIIIOOOOIIIIIIII
$D
```

Рис. 4. Лист каналов измерения и векторный файл тестера ETC-780

С транслятором *CAE Link* имеется возможность преобразовывать любые столбцы тестовых векторов в формате *ASCII*. Чтобы транслировать файл *ASCII*, *CAE-Link* конвертирует вектора в загружаемый двоичный файл для тестера.

С помощью окна *Vectors* можно загрузить, просмотреть, отредактировать и создать тестовые вектора.

Режим *VectorGraph (векторный график)* соединяет логические состояния векторов с назначенным временем. Этот «логический анализатор» позволяет быстро анализировать отношения между информационными каналами и векторами. Просмотр информации векторов в статическом режиме ориентирован на вертикальные столбцы. В векторном графе просмотр будет происходить горизонтально слева направо, отражая увеличение векторного номера, изменяющегося во времени

Данные, полученные от *DUT*-платы, отображены наряду с входными состояниями для каждого вектора в такой же последовательности, как рассматривается в окне *Vectors*.

В программируемом режиме можно использовать циклы и переходы, заставляя некоторые вектора выполняться несколько раз.

Analysis позволяет быстро отредактировать ошибку или изменить логическое состояние одного или нескольких каналов.

Во вкладке *TestSetup* для тестирования необходимо ввести значения напряжений питания, логических уровней и пр.

После определения и группировки каналов измерения, установки значения напряжения источника питания *DUT*, транслирования векторов и подключения *DUT*-платы следующим шагом необходимо установить параметры для контроля теста (рис. 5).

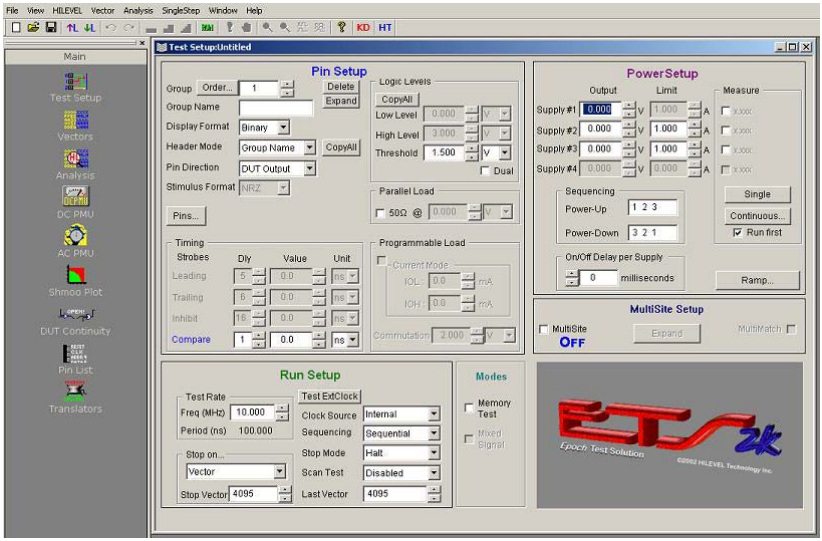


Рис. 5. Окно установки тестирования

Если по результатам тестирования не будет выдано ошибок, то тестирование можно считать успешным, а цифровую микросхему – соответствующую заявленным характеристикам.

Список литературы

1. *Сабунин*, *А. Е.* AltiumDesigner // Новые решения в проектировании электронных устройств. – М. : Солон-пресс, 2009.

2. Система контрольно-измерительная для контроля БИС и ИМС // Тестер FORMULA 2K. – URL: http://metrol.expoprom.ru/oborudovanie/glossarium/2014-03-24-11-09.php

3. Система контрольно-измерительная для контроля БИС и ИМС // Тестер FORMULA 2K. Руководство по эксплуатации. – М. : ФОРМ, Редакция 14.

4. Тестер параметров цифровых интегральных микросхем «ETC-868 Griffin III» // Руководство по эксплуатации. – М. : ДМТ ТРЕЙДИНГ, 2012.

Digital microcircuits testing and special equipment for parameters measuring

In this article, method of digital microcircuits is studied. In the course of preparation for testing software have been used, and more specifically AltiumDesigner is used to create transition board. Datasheet is applied for spotting the tolerances of required parameters. Based on this information, the tester installation is made. If all of the measured parameters are consistent to declared ones, microcircuit is considered to pass control.

Keywords: adapter plate; testing of microcircuits; AltiumDesigner; Formula 2k; ETS-780

УДК 621.391

И. А. Кайсина, студент
Д. С. Ершов, ведущий специалист по ИТ
М. А. Чайников, студент
Д. С. Васильев, кандидат технических наук
А. В. Абилов, кандидат технических наук, доцент
E-mail: irinakaysina25@gmail.com
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Обзор метода *MPLS VPN* для построения корпоративных сетей с *mesh*-топологией

Сделан обзор метода MPLS VPN, который может использоваться для построения единой корпоративной сети на основе географически разнесенных локальных сетей. Этот метод подразумевает применение технологии коммутации пакетов по меткам (MPLS, Multiprotocol Label Switching) для создания виртуальных частных сетей (VPN, Virtual Private Network). В статье описано как метод MPLS VPN может быть использован для построения территориально-распределенных корпоративных сетей с многосвязной топологией (mesh-топологией) и обозначены его преимущества при организации таких сетей.

Ключевые слова: многосвязная топология; *VPN*; *MPLS*; *MPLS VPN*; *IP*-пакет; коммутация, маршрутизация

Очень часто филиалы одной компании располагаются в различных уголках России, а порой и целого мира. При этом важна стабильная связь между всеми сотрудниками, а также соблюдение конфиденциальности передаваемой информации. Для повышения безопасности и качества обслуживания (*QoS*, *Quality of Service*) может быть предложен метод *MPLS VPN* (*Multiprotocol Label Switching Virtual Private Network*), который позволит построить территориально-распределенную корпоративную сеть с многосвязной (*mesh*) топологией. При этом наибольший интерес вызывают вопросы обеспечения качества передачи данных. В какой-то степени эти вопросы решаются в работах [1–8].

Mesh-топология. Сеть с многосвязной топологией (*mesh*-сеть) имеет ячеистую структуру (рис. 1). Узлы *mesh*-сети не только предоставляют услуги доступа для конечных абонентов, но и выполняют функции ретрансляторов, т. е. между каждыми двумя узлами имеется,

© Кайсина И. А., Ершов Д. С., Чайников М. А., Васильев Д. С., Абилов А. В., 2017

по крайней мере, два независимых пути. Благодаря этому появляется возможность резервирования, что крайне важно при передаче потокового трафика [9].

Сегодня под *mesh*-сетями подразумеваются как беспроводные сети доступа, например, на основе стандарта 802.11s (*Wi-Fi Mesh*), так и сети на основе волоконно-оптических и медных кабелей с резервными каналами. В таких неподвижных сетях, *mesh*-топология может быть организована на логическом уровне, т. е. с помощью технологии виртуальных частных сетей (*VPN*), когда в качестве каналов связи будут выступать *VPN*-туннели.Такая виртуальная *mesh*-сеть может обеспечивать высокий уровень *QoS* и безопасности.

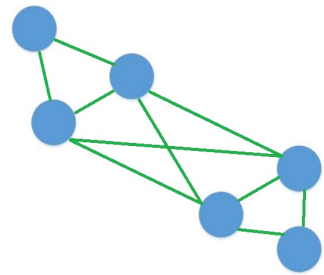


Рис. 1. Пример *mesh*-топологии

VPN (*Virtual Private Network*) – набор технологий и протоколов, которые позволяют обеспечить одно или несколько сетевых соединений (логическую сеть) поверх другой сети: один пользователь может видеть другого так, как если бы он находился в соседней комнате и имел прямое физическое подключение (через коммутатор или маршрутизатор). При реализации *VPN* используются средства криптографии (шифрование, аутентификация, инфраструктуры открытых ключей, средства для защиты от повторов и изменений, передаваемых по логической сети сообщений), что повышает уровень доверия данной логической сети. Пример *VPN*-соединения представлен на рис. 2.

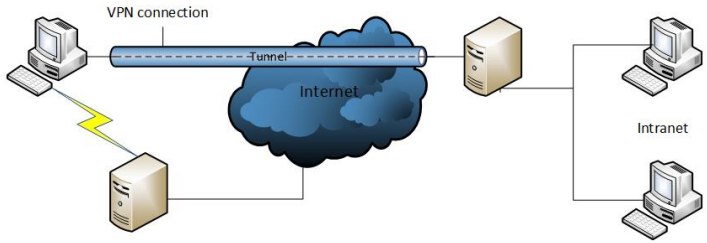


Рис. 2. Пример *VPN*-соединения

MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) – мультипротокольная коммутация по меткам. В традиционных сетях маршрутизация пакетов осу-

ществляется на основе *IP*-адреса назначения (*Destination IP Address*). Каждый маршрутизатор в сети обладает информацией о том, через какой интерфейс и к какому соседу необходимо перенаправить пришедший *IP*-пакет. Мультипротокольная коммутация по меткам предлагает несколько другой подход. Каждому *IP*-пакету назначается метка, а маршрутизаторы принимают решение о передаче пакета следующему устройству на основании значения метки. Метка добавляется в составе *MPLS* заголовка, который добавляется между заголовком кадра (второй уровень модели *OSI*) и заголовком пакета (третий уровень модели *OSI*). На рис. 3 представлен кадр с *MPLS* [10].

Рис. 3. Место *MPLS*-заголовка в кадре

MPLS VPN. При рассмотрении метода *MPLS VPN* важно выделить следующие понятия:

– *CE* (*Customer Edge Router*) – граничное устройство в локальной вычислительной сети абонента, который непосредственно подключается к маршрутизатору оператора;

– *PE* (*Provide Edge*) – граничный маршрутизатор со стороны оператора (*MPLS* домена), к которому подключаются устройства *CE*;

– *P* (*Provide*) – маршрутизатор внутри сети оператора (MPLS домена).

При использовании оператором метода *MPLS VPN* маршрутизаторы оператора (*PE*) образуют *MPLS* домен (рис. 4). При таком подключении каждому абоненту можно организовать его личный *VPN* и обеспечить соединение типа «каждый с каждым» [11].

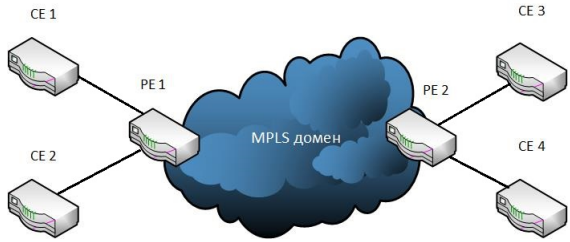


Рис. 4. Схема *MPLS* домен и подключенных узлов клиента

Главными преимуществами метода *MPLS VPN* являются:

– масштабируемость;

– возможность пересечения адресных пространств – узлов, подключенных в различные *VPN*;

– изолирование трафика *VPN* друг от друга на втором уровне модели *OSI*.

Масштабируемость достигается за счет того, что подключение нового узла в существующий *VPN* производится только перенастройкой одного *PE*, к которому подключается данный узел. В различных *VPN* адресные пространства могут пересекаться, что может быть чрезвычайно полезным, в случае если оператору необходимо предоставить *VPN* нескольким клиентам, использующим одинаковое приватное адресное пространство, например адреса 10.0.0.0/8.

Устройства *P* при коммутации анализируют только внешнюю метку и не анализируют заголовок *IP*-пакета, то справедливо говорить о том, что *P*-устройства выполняют функции коммутации на втором уровне модели *OSI*. Устройства PE также разделяют маршрутную информацию, таблицы маршрутизации, интерфейсы, направленные в сторону устройств *CE*. Тем самым процессы маршрутизации разных *VPN*-сетей обеспечиваются разделением трафика от разных сетей на втором уровне модели OSI [12].

Mesh-топология на основе метода MPLS VPN. Виртуальная *mesh*-топология будет представлять собой подключение типа «каждый с каждым» при помощи *VPN*. Топология сети позволяет осуществлять обмен трафиком по кратчайшему маршруту между любыми абонентами, находящимися в разных локальных сетях, что является важным условием для потоковых данных. Такая сеть улучшает *QoS* (увеличение доступности, снижение задержек, джиттера и т. д.) и повышает отказоустойчивость.

Реализация виртуальной *mesh*-топологии может быть хорошим решением для больших компаний, которые озабочены безопасностью данных и должным качеством обслуживания.

Список литературы

1. *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. – Т. 6. – № 7. – С. 141–145.

2. *Чунаев*, *А. В.* Влияние характеристик передачи потоковых данных на качество видео в WLAN / А. В. Чунаев, А. В. Абилов, А. И. Нистюк // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – Т. 6. – № 7. – С. 219–224.

3. *Васильев, Д. С.* Экспериментальное исследование качества передачи видео в древовидной P2P-сети с алгоритмом ARQ прикладного уровня / Д. С. Васильев, А. В. Чунаев, А. В. Абилов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2014. – Т. 8. – № 1. – С. 10–14.

4. *Абилов, А. В.* Повышение качества передачи потоковых данных в сетях БПЛА с помощью PULL-PUSH-подхода / А. В. Абилов, Д. С. Васильев // Инфокоммуникационные технологии. – 2014. – Т. 12. – № 4. – С. 45–50.

5. *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.

6. *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.

7. *Емельянов, В. Н.* Применение адаптивных алгоритмов управления с использованием временного окна для передачи потоковых данных / В. Н. Емельянов, А. В. Абилов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – Т. 6. – № 7. – С. 85–90.

8. *Ревило, О. А.* Алгоритмы оценки потерь пакетов с адаптацией по выборке для сетей передачи потоковых данных / О. А. Ревило, В. Н. Емельянов, А. В. Абилов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – Т. 6. – № 7. – С. 161–164.

9. *Perkins, C. E.* Ad hoc Networks. Addison-Wesley, 2001. – 284 p.

10. Организация VPN на базе MPLS // proitclub. – URL: http://proitclub.ru/2010/05/20/mplsvpn2/ (дата обращения: 7.11.2016).

11. Организация VPN на базе MPLS // opennet. – URL: http://www.opennet.ru/docs/RUS/mpls/mplsvpn.html (дата обращения: 9.11.2016).

12. RFC4364 "BGP/MPLS IP Virtual Private Networks (VPNs)" // ietf. – URL: https://tools.ietf.org/html/rfc4364 (дата обращения: 10.11.2016).

The Review of the MPLS VPN Method for Creation of Corporate Networks with Mesh Topology

The article gives an overview of the method of MPLS VPN, which can be used for building a single corporate network on the basis of geographically separated local area networks. This method involves the application of the multiprotocol label switching (MPLS) technology to create virtual private networks (VPN). This article describes how MPLS VPN method can be used to build a geographically distributed enterprise networks with a mesh topology and outlines its advantages in organization of such networks.

Keywords: mesh topology; VPN; MPLS; MPLS VPN; IP-packet; switching; routing

УДК 631.396.6

Н. А. Королев, студент
Я. А. Рукавишников, студент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
Е. М. Зайцева, кандидат педагогических наук, доцент
E-mail: em_zaytseva@yahoo.com

Интерактивное учебное пособие для обучения работе в среде *MicroCap* по дисциплине «Основы компьютерного проектирования радиоэлектронных средств»

Статья посвящена вопросу создания интерактивного электронного учебного пособия по дисциплине «Основы компьютерного проектирования радиоэлектронных средств».

Ключевые слова: *MicroCap*; радиотехника; компьютерное проектирование радиоэлектронных средств; интерактивное учебное пособие

В ИжГТУ имени М. Т. Калашникова дисциплина «Основы компьютерного проектирования радиоэлектронных средств» входит в учебный план направления подготовки 11.03.01 «Радиотехника» и специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы». ФГОС определены требования к выпускнику в виде списка компетенций, важнейшими из которых являются: владение навыками схемотехнического моделирования и выполнения математических расчетов с использованием прикладных программных продуктов. Для проектирования и моделирования радиоэлектронных средств в ИжГТУ в основном применяется программа *MicroCap*. Программа хороша тем, что она довольно проста в изучении, доступна и имеет возможность подключения дополнительных библиотек.

Студенты ИжГТУ после окончания вуза работают на предприятиях г. Ижевска, и не все понимают значение программ схемотехнического моделирования, нужно самостоятельно выполнять моделирование работы схем электрических принципиальных.

Проблемы недостаточного освоения студентами возможностей программ схемотехнического моделирования можно разрешить следующими способами:

1. Внесением изменения в рабочие программы учебных дисциплин с дальнейшей переработкой лекционного материала.

© Королев Н. А., Рукавишников Я. А., Зайцева Е. М., 2017

2. Созданием подробного и наглядного методического пособия.

В связи с тем, что по дисциплине «Основы компьютерного проектирования РЭС» предусмотрена небольшая аудиторная нагрузка (16 часов), то коррекция содержания лекционного материала невозможна. Студентам очной формы обучения требуется выполнить: 4 лабораторные работы по проектированию РЭС в среде *MicroCap*, а также курсовую работу «Проектирование цифровых устройств». В ходе выполнения курсовой работы студенты выполняют моделирование и анализ временных диаграмм различных цифровых устройств (шифратор, мультиплексор, счетчик, регистр и т. д.). Студентам заочной формы обучения также нужно выполнить курсовую работу по аналогичной тематике. В этот момент встает проблема недостатка навыков работы с программой. Данная проблема решается путем разработки и использования в учебном процессе интерактивного видеопособия для самостоятельной работы студентов.

На кафедре «Радиотехника» с 2010 г. ведется работа по подготовке электронных учебных пособий [1, 2], которые используются при обучении студентов, но разрабатываемое пособие будет соответствовать современным требованиям и может использоваться как для самостоятельной работы студентов, так и в системе дистанционного обучения.

В процессе разработки пособия для самостоятельной работы студентов выполнены следующие этапы:

1. Подбор и изучение учебного материала.

2. Выбор программы для создания учебного пособия.

3. Определение структуры пособия, формирование содержания.

4. Создание электронного учебного пособия с использованием средств информационных технологий.

5. Создание видеопособия.

6. Оформление пособия, формирование списка литературы и контрольных вопросов по учебному материалу.

7. Экспертиза учебного пособия.

Учебное пособие содержит три видеофайла:

Показательное видео работы в среде *MicroCap*. В этом видеоматериале описывается интерфейс программы, а также проектирование несложных схем и анализ их графиков. Длительность видео – 10 минут.

1. Проектирование операционного усилителя. Построение и проверка работоспособности схемы.

2. Длительность видео – 15 минут.

3. Проектирование мультиплексора К155КП1.

В этом видео дан пример выполнения курсовой работы, при этом за основу взят справочник В. Л. Шило [3], содержащий электрические

схемы и временные диаграммы всех микросхем. Студент может самостоятельно изучить все этапы выполнения курсовой работы, особенности выбора элементной базы и пример выполнения анализа результатов моделирования. Длительность видео 25 минут.

Данная работа проведена студентами кафедры «Радиотехника» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова.

В процессе создания интерактивного учебного пособия для самостоятельной работы студентов использованы учебная литература [4, 5]. Пособие выполнено с использованием программы *MicroCap-11*, программы для захвата видео на экране компьютера *FastStone Capture*, а также *Sony Vegas Pro* для сведения видеозаписи и звуковой дорожки.

В настоящее время проводится апробирование в учебном процессе и экспертиза разработанного информационного ресурса, по результатам которой, будет проводиться регистрация методического пособия.

В заключение следует отметить, что данное интерактивное учебное пособие позволит повысить качество обучения студентов направления подготовки «Радиотехника» и специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы», а также найдет применение при выполнении курсовой работы по дисциплине «Основы компьютерного проектирования РЭС» для студентов очной и заочной форм обучения.

Список литературы

1. *Зайцева*, *Е. М.* Использование информационных технологий в процессе проектирования радиоэлектронных средств / Е. М. Зайцева, Н. А. Королев, А. С. Раев // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сб. материалов IV Всерос. науч.-техн. конф. асп., магистр. и молодых ученых с междунар. участием ; отв. за вып.: А. П. Тюрин, В. В. Сяктерева. – 2016. – С. 315–317. – URL: http://elibrary.ru/item.asp?id=26197618

2. Создание базы технических терминов, представленной в оболочке электронного словаря ANYLEXIC / А. Ю. Маркитонов, А. А. Мальцева, А. Н. Копысов, Е. М. Зайцева // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сб. материалов III Всерос. науч.-техн. конф. асп., магистр. и молодых ученых с междунар. участием : электрон. науч. изд-е ; отв. за вып: А. П. Тюрин, А. Н. Домбрачев. – 2015. – С. 317–320. – URL: http://elibrary.ru/item.asp?id=15843368

3. *Шило*, *В. Л.* Популярные цифровые микросхемы : справ. – М., Радио и связь, 1987.

4. *Амелина*, *М. А.* Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10 / М. А. Амелина, С. А. Амелин. – Смоленск : Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2013. – 618 с.

5. *Антипенский*, *Р. В.* Схемотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств / Р. В. Антипенский, А. Г. Фадин. – М. : Техносфера, 2007. 128 с.

Interactive tutorial for learning to MicroCap on discipline ”Bases of computer designing of radio-electronic means“

The article is devoted to the creation of interactive electronic textbook on discipline ”Fundamentals of computer-aided design of radio-electronic facilities“.

Keywords: computer design of radio-electronic facilities; the online tutorial for students' independent work; stages of engineering activities; MicroCap program.

УДК 621.396.96

А. О. Мартынов, студент
А. О. Печников, студент
Е. М. Зайцева, кандидат педагогических наук, доцент
E-mail: em_zaytseva@yahoo.com
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Сравнительная характеристика программ схемотехнического моделирования цифровых и аналоговых устройств

Статья посвящена выбору программного обеспечения для проведения лабораторных работ по курсу «Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных средств» за счет составления сравнительной характеристики программного обеспечения для проведения схемотехнического моделирования цифровых и аналоговых устройств.

Ключевые слова: радиотехника; программное обеспечение, компьютерное проектирование и моделирование радиоэлектронных средств; схемотехническое моделирование

В условиях модернизации российской системы образования, предъявляются высокие требования к уровню подготовки студентов по радиотехническим специальностям и, как следствие, – к подготовке выпускников технических вузов в области информационных технологий.

В ИжГТУ имени М. Т. Калашникова значительная часть студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» и направления подготовки 11.03.01 «Радиотехника» обучается по направлениям ведущих промышленных предприятий города Ижевска и Удмуртской Республики. В связи с этим вуз и выпускающая кафедра при выборе программного обеспечения для проведения лабораторных работ и курсового проектирования должны учитывать как запросы работодателей, так и тенденции использования программного обеспечения ведущих мировых разработчиков.

Данная работа выполнена студентами кафедры «Радиотехника» Ижевского государственного технического университета в форме формирования предложений по оптимизации учебного процесса по дисциплине «Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных средств». В ходе изучения данной дисциплины студенты должны получить навыки использования программного

© Мартынов А. О., Печников А. О., Зайцева Е. М., 2017

обеспечения при проведении схемотехнического моделирования работы радиоэлектронных средств.

По данному курсу предусмотрено 16 часов лабораторного практикума, для выполнения которых используется студенческая версия программы *Micro-Cap 11* компании *Spectrum Software*.

Следует отметить, что *Micro-Cap* хорошо подходит для освоения основ схемотехнического компьютерного моделирования в связи с тем, что у него простой и понятный интерфейс, достаточная элементная база, достаточный объем информации для выполнения лабораторных работ. Кроме того, по данному курсу студенты выполняют курсовую работу, задача которой – проектирование и анализ работы цифрового устройства.

Таким образом, цель данной работы: не только доказать преимущества использования программы *Micro-Cap* в курсе «Основы компьютерного проектирования и моделирования», но и выявить более актуальные на начало 2017 г. программные продукты для выполнения схемотехнического моделирования аналоговых и цифровых устройств.

В ходе исследования проведен анализ компаний разработчиков программного обеспечения в сфере проектирования и моделирования радиоэлектронных устройств и программных продуктов, которые они представляют на рынок. Поиск информации проводился с использованием ресурсов сети Интернет, а для оценки – доступные технические сайты, научная литература, официальные сайты компаний, работающих в данной сфере.

Выполнена оценка более 20 программ для выполнения схемотехнического моделирования. Под пристальное внимание попало не только современное программное обеспечение, но и уже проверенные продукты, от компаний, которые зарекомендовали себя с течением времени.

По результатам оценки актуальности и функциональных возможностей выбрано 7 программных продуктов ведущих компаний, которые представлены в табл. 1.

Приведем краткие характеристики программ, представленных в таблице 1.

AWR Design Environment – программа, разработанная компанией *National Instruments*, предназначена для проектирования ВЧ и СВЧ радиоэлектронных устройств. Данный продукт имеет удобный интерфейс, огромное количество пользовательских настроек и все необходимые настраиваемые параметры для синтеза и анализа радиоэлектронных средств и устройств. Отличительной особенностью данной программы от продуктов других компаний является возможность создания СВЧ-устройств.

Таблица 1. **Список программного обеспечения (по результатам анализа)**

Название продукта	Разработчик (официальный сайт)	Назначение
AWR Design Environment	National Instruments [http://www.awrcorp.com]	Проектирование ВЧ и СВЧ радиоэлектронных устройств
LabVIEW	National Instruments [http://www.ni.com/labview]	Среда графического программирования цифровых устройств
Multisim	National Instruments [http://www.ni.com/multisim]	Моделирование электронных схем и разводка печатных плат
Qucs	Qucs team [http://qucs.sourceforge.net]	Моделирование электронных цепей
DipTrace	Novarm [http://diptrace.com]	Разработка электронных печатных плат и схемотехнической документации
Micro-Cap	Spectrum Software [http://www.spectrum-soft.com]	Аналоговое и цифровое моделирование электрических и электронных цепей
Proteus	Labcenter Electronics Ltd [https://www.labcenter.com]	Моделирование аналоговых и цифровых схем и разработка печатных плат

LabVIEW – разработка компании *National Instruments*, возможности которой основываются на графическом программировании цифровых устройств. Значительно отличается от своих аналогов, поскольку ее среда представляет собой не проектирование и моделирование устройств в том смысле, в котором принято это понимать. Основная особенность – система «приложение в приложении». Программа позволяет с помощью своеобразных блок-схем создавать модели или полноценные рабочие алгоритмы для анализа и дальнейшего их использования, причем как внутри среды на персональном компьютере, так и для управления подключаемых к нему лабораторными стендами [1].

Multisim – продукт *National Instruments*, значительно отличается от предыдущих двух программ, поскольку он гораздо проще, имеет минимум дополнительных возможностей, это, скорей, прямой аналог программы *MicroCap*. Программа не уступает ни одному вышеперечисленному продукту ни по элементной базе, ни по возможностям моделирования или проектирования. Программное обеспечение справляется с любой возложенной на него задачей, будь то сам синтез устройств или их анализ [2].

Qucs – программа компании *Qucs team*, которая специализируется исключительно на моделировании электронных цепей. Несмотря на свою простоту программа имеет ряд полезных функций, среди которых все необходимые виды моделирования и анализа цепей, удобный интерфейс, большая элементная база, открытый программный код и поддержка пользовательских настроек. Важно отметить, что *Qucs* предоставляет возможность использования различных подцепей системы *SPICE*. К плюсам стоит отнести условия использования данного продукта – он распространяется по лицензии *GPL*, т. е. программа является бесплатной [3].

DipTrace – программное обеспечение компании *Novarm*, специализируется на разработке электронных печатных плат и схемотехнической документации. Среди достоинств стоит отметить очень удобный интерфейс, большую элементную базу как стандартных, так и узкоспециализированных компонентов, а также возможность 3D- моделирования. Большим плюсом данного продукта является возможность быстрой адаптации программы под конкретные задачи. Пользователь, составив принципиальную электрическую схему, может нажатием одной кнопки перейти в режим проектирования печатной платы для той же схемы, тем самым снизив общее время разработки какой-либо части проекта [4].

Micro-Cap – программа компаний *Spectrum Software*, специализирующаяся на проведении аналогового и цифрового моделирования электрических и электронных цепей. Отлично себя зарекомендовала не только в различных высших учебных заведениях, но и в профессиональной деятельности различных компаний. Продукт представляет собой среду с большим количеством всех необходимых элементов для разработки электрических аналоговых и цифровых схем. Важный плюс: при необходимости можно подключать дополнительные библиотеки элементов [5].

Proteus – продукт компании *Labcenter Electronics Ltd*, специализируется на моделировании аналоговых и цифровых схем и разработке печатных плат. Программа по своим функциям схожа с *DipTrace* и с *Micro-Cap*, однако имеет свой уникальный интерфейс, открытый программный код для настройки элементов. Среда имеет очень удобную систему анализа параметров и при необходимости может зафиксировать их в отдельном окне.

Вышеперечисленные программы, выбраны для дальнейшего анализа, т. к. они поддерживают гораздо больше функций, чем их аналоги, у них большие библиотеки компонентов, для них имеется достаточное количество учебных пособий, что особенно актуально использования

в учебном процессе. Для выбора оптимальной программы для обучения студентов сделана их сравнительная характеристика (табл. 2) по самым значимым параметрам, начиная от функциональных возможностей и заканчивая ценами на программное обеспечение.

Таблица 2. **Сравнительная характеристика программ схемотехнического моделирования**

Критерий	Название программного обеспечения						
	AWR DE	*Lab VIEW*	*Multisim*	*Qucs*	*Dip Trace*	*Micro-Cap*	*Proteus*
Поддержка русского языка	–	+	–	–	+	–	+
Простота использования интерфейса	+	+	+	+	+	+	+
Льготы образовательным учреждениям	+	+	+	*GPL**	+	+	+
Стоимость лицензии, долл.	3500–4000	1000–6100	2800	*GPL**	35–650	3000–4500	1000–2000
Построение частотных характеристик	+	+	+	+	+	+	+
Динамические измерения	–	+	+	–	+	+	+
3D - моделирование	+	+	–	–	+	–	+
Проектирование печатных плат	–	–	+	–	+	–	+
Подключение библиотек	-	+	+	+	+	+	+
Экспорт/Импорт форматов файлов	–	–	–	–	+	–	–

**GPL* – лицензия на свободное программное обеспечение

Анализ табл. 2 показал, что актуальными программами являются продукты компании *National Instruments*, *LabVIEW* и *Novarm*, а также программа *DipTrace*, поскольку возможности этих программ значительно шире. А программное обеспечение, используемое студентами при выполнении лабораторных работ по дисциплине «Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных средств», т. е. программа *Micro-Cap*, не является на сегодняшний день столь же функциональной, как две программы, отмеченные выше.

Мы считаем, что в программу курса «Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных средств» стоит внести изменения, а именно заменить программу *Micro-Cap* на более

функциональный продукт *DipTrace* и добавить лабораторный практикум по изучению основ работы в *LabVIEW*.

При оценке результатов данного исследования важно учитывать, что при составлении сравнительной характеристики использована информация, размещенная в интернете на официальных сайтах компаний, разработавших вышеуказанные продукты. В дальнейшем данная тематика будет продолжена. Планируется провести опрос представителей ведущих предприятий города Ижевска и Удмуртской Республики, профессионально занимающихся моделированием и проектированием радиоэлектронных средств.

Список литературы

1. National Instruments Россия. – URL: http://www.labview.ru/ (дата обращения: 05.10.2016).

2. Моделирование схем в программе Multisim // Основы электроники для студентов, радиолюбителей, инженеров. – URL: http://www.sxemotehnika.ru/zhurnal/modelirovanie-skhem-v-programme-multisim.html (дата обращения: 05.10.2016).

3. Qucs project: documentation // Qucs project: Quite Universal Circuit Simulator. – URL: http://qucs.sourceforge.net/docs.html (дата обращения: 05.10.2016).

4. DipTrace и ГОСТ. Библиотека УГО // Хабрахабр. – URL: https://habrahabr.ru/post/166895/ (дата обращения: 28.10.2016).

5. *Амелина*, *М. А*. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10 / М. А. Амелина, С. А. Амелин. – Смоленск : Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2013. – 618 с.

Comparative characteristics of programs for circuit simulation of digital and analog devices

The article is devoted to the selection of software for conducting laboratory works on the course "Fundamentals of Computer Design and Modeling of Radio-electronic Facilities" by compiling the comparative characteristics of software for carrying out circuit simulation of digital and analog devices.

Keywords: radio engineering; software; computer design and modeling of radio-electronic means; circuit simulation

УДК 621.391

И. Б. Петрушина, доцент
E-mail: psatsi@gmail.com
Р. А. Косарев, студент
E-mail: rkosarev0@gmail.com
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

К вопросу о расчете переходной характеристики в радиотехнических цепях

Ставится задача расчета переходной характеристики в радиотехнических цепях с помощью операторного метода анализа.

Ключевые слова: радиотехника; операторный метод; двойной Т-образный мост; передаточная функция; переходная характеристика; теория электрических цепей

Для расчета переходной характеристики в радиотехнических цепях обычно используют классический метод решения дифференциальных уравнений. Количество реактивных элементов влияет на порядок дифференциального уравнения, что приводит к сложности решения задачи. Операторный метод анализа приводит к решению алгебраических уравнений с использованием изображений по Лапласу [1–4]. В данной статье предлагается алгоритм расчета переходной характеристики двойного Т-образного моста операторным методом (рис. 1).

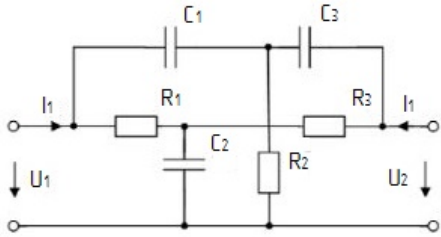


Рис. 1. Электрическая схема двойного Т-образного моста

Данный алгоритм был приведён в статье доцента кафедры «Радиотехника» И. Б. Петрушиной и студента кафедры «Радиотехника»

© Петрушина И. Б., Косарев Р. А., 2017

А. А. Калабина «К вопросу о расчете передаточной функции в радиотехнических цепях», в которой находились передаточная функция и частотные характеристики двойного Т-образного моста [5].

В схеме (рис. 1) дано: $R_1 = 2R_2$, $C_2 = 2C_1$, $R_1 = R_3 = R$, $C_1 = C_3 = C$.

Передаточная функция цепи – это отношение изображения выходного сигнала к изображению выходного при нулевых начальных условиях.

$$K(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{1}{1 + \dfrac{4RpC}{R^2 p^2 C^2}}. \tag{1}$$

Переходная характеристика ($g(t)$) – это реакция цепи на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях.

Из определения переходной характеристики найдем изображение переходной характеристики и приведем его к табличному виду:

$$g(p) = \frac{K(p)}{p} = \frac{1}{1 + \dfrac{4RpC}{R^2 p^2 C^2}} \cdot \frac{1}{p} = \frac{1}{(R^2 p^2 C^2 + 4RpC + 1)p}, \tag{2}$$

$$R^2 p^2 C^2 + 4RpC + 1 = 0, \quad D = 16R^2 C^2 - 4R^2 C^2 = 12R^2 C^2,$$

$$p_1 = \frac{-2 + \sqrt{3}}{RC}, \quad p_2 = \frac{-2 - \sqrt{3}}{RC}.$$

Корни характеристического уравнения находятся для приведения к табличному виду.

$$R^2 p^2 C^2 + 4RpC + 1 = R^2 C^2 \left(p - \frac{-2 + \sqrt{3}}{RC} \right) \left(p - \frac{-2 - \sqrt{3}}{RC} \right);$$

$$g(p) = \frac{1 + R^2 p^2 C^2}{R^2 C^2 \left(p - \frac{-2 + \sqrt{3}}{RC} \right) \left(p - \frac{-2 - \sqrt{3}}{RC} \right) p} =$$

$$= \frac{1}{R^2 C^2 \left(p - \frac{-2 + \sqrt{3}}{RC} \right) \left(p - \frac{-2 - \sqrt{3}}{RC} \right) p} + \frac{R^2 p^2 C^2}{R^2 C^2 \left(p - \frac{-2 + \sqrt{3}}{RC} \right) \left(p - \frac{-2 - \sqrt{3}}{RC} \right) p} = \tag{3}$$

$$= \frac{1}{R^2 C^2 \left(p - \frac{-2 + \sqrt{3}}{RC} \right) \left(p - \frac{-2 - \sqrt{3}}{RC} \right) p} + \frac{p}{\left(p - \frac{-2 + \sqrt{3}}{RC} \right) \left(p - \frac{-2 - \sqrt{3}}{RC} \right)}.$$

Найдем переходную характеристику $g(t)$ с помощью таблицы преобразований Лапласа:

$$F(p)=\frac{1}{p(p+\alpha)(p+\beta)}=\frac{p}{(p+\alpha)(p+\beta)}, \tag{4}$$

$$f(t)=\frac{1}{\alpha\beta}+\frac{1}{\beta-\alpha}\left(\frac{e^{-\beta t}}{\beta}-\frac{e^{-\alpha t}}{\alpha}\right)=\frac{1}{\beta-\alpha}\left(\beta e^{-\beta t}-\alpha e^{-\alpha t}\right), \tag{5}$$

$$\alpha=\frac{-2+\sqrt{3}}{RC},\quad \beta=\frac{-2-\sqrt{3}}{RC},$$

где $f(t)$ – оригинал; $F(p)$ – изображение.

$$g(t)=\frac{1}{R^2C^2\left(\frac{4-3}{R^2C^2}\right)}+\frac{1}{R^2C^2\left(\frac{-2-\sqrt{3}}{R^2C^2}\right)}\left(\frac{e^{-\beta t}}{\frac{-2-\sqrt{3}}{RC}}-\frac{e^{-\alpha t}}{\frac{-2+\sqrt{3}}{RC}}\right)+$$

$$+\frac{1}{\frac{-2\sqrt{3}}{RC}}\left(\frac{2-\sqrt{3}}{RC}e^{-\beta t}-\frac{2+\sqrt{3}}{RC}e^{-\alpha t}\right)=$$

$$=1+\frac{1}{-2\sqrt{3}}\left(\frac{e^{-\beta t}}{-2-\sqrt{3}}-\frac{e^{-\alpha t}}{-2+\sqrt{3}}\right)+\frac{1}{-2\sqrt{3}}\left(\left(2-\sqrt{3}\right)e^{-\beta t}-\left(2+\sqrt{3}\right)e^{-\alpha t}\right)=$$

$$=1+\frac{1}{-2\sqrt{3}}\left(\left(\frac{e^{-\beta t}}{-2-\sqrt{3}}-\frac{e^{-\alpha t}}{-2+\sqrt{3}}\right)+\left((2-\sqrt{3})e^{-\beta t}-(2+\sqrt{3})e^{-\alpha t}\right)\right)=$$

$$=1+\frac{1}{-2\sqrt{3}}\left(\left(\frac{1}{2-\sqrt{3}}+2-\sqrt{3}\right)e^{-\beta t}-\left(\frac{1}{2+\sqrt{3}}+2+\sqrt{3}\right)e^{-\alpha t}\right)=$$

$$=1+\frac{1}{-2\sqrt{3}}\left(\left(\frac{8-4\sqrt{3}}{2-\sqrt{3}}\right)e^{-\beta t}-\left(\frac{8+4\sqrt{3}}{2+\sqrt{3}}\right)e^{-\alpha t}\right)=$$

$$1-\frac{2}{\sqrt{3}}e^{-\frac{2-\sqrt{3}}{RC}t}+\frac{2}{\sqrt{3}}e^{-\frac{2+\sqrt{3}}{RC}t}. \tag{6}$$

Пример графика переходной характеристики при R = 100 кОм, C = 200 пФ (рис. 2)

Приведенный в статье операторный метод расчета переходной характеристики радиотехнических цепей используется при изучении

дисциплины «Теория электрических цепей» в ИжГТУ имени М. Т. Калашникова на кафедре «Радиотехника».

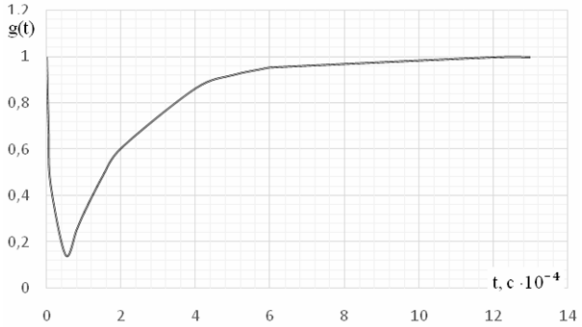


Рис. 2. График зависимости переходной характеристики от времени

Список литературы

1. *Фриск*, *В. В*. Теория электрических цепей : конспект лекций / В. В. Фриск, Н. И. Смирнов. – М. : Горячая линия. – Телеком, 2016. – 270 с.

2. *Попов*, *В. П.* Основы теории цепей / В. П. Попов, В. А. Ляшев, Н. И. Мережин. – М. : Юрайт, 2015. – 695 с.

3. *Бакалов*, *В. П.* Основы теории цепей для высших учебных заведений / В. П. Бакалов, В. Ф. Дмитриков, Б. И. Крук. – М. : Горячая Линия – Телеком, 2013. – 596 с.

4. *Стребков*, *Д. С*. Основы теории цепей / Д. С. Стребков, А. Х. Шогенов. – М. : Юрайт, 2016. – 248 с.

5. *Петрушина*, *И. Б*. К вопросу о расчете передаточной функции в радиотехнических цепях / И. Б. Петрушина, А. А. Калабин // Приборостроение в XXI веке – 2014. 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. 423–429.

The Problem of the Calculation of the Transient Characteristics in Radiotechnical Circuits

In this article, the aim is to calculate the transient characteristics in radiotechnical circuits using operator method of analysis.

Keywords: radiotechnics; operator method; double T-shaped bridge; transfer function; transient characteristics; the theory of electric circuits

УДК.621.391

И. Б. Петрушина, доцент
E-mail: psatsi@gmail.com
К. А. Тихонов, студент
E-mail: kirill444enok@gmail.com
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

К вопросу о расчете частотных характеристик в радиотехнических цепях

Ставится задача расчета частотных характеристик в радиотехнических цепях с помощью операторного метода анализа.

Ключевые слова: расчет частотных характеристик; тройной Г-образный фильтр высоких частот; операторный метод; радиотехническая цепь

Для расчета частотных характеристик радиотехнических цепей используют, как правило, комплексный коэффициент передачи, модуль которого есть амплитудно-частотная характеристика (далее АЧХ), а его фаза есть фазо-частотная характеристика [1–4] (далее ФЧХ). Однако использование комплексных величин усложняет вычисления. Удобнее использовать передаточнуюфункцию, представленную в операторной форме. В данной статье предлагается алгоритм расчета частотных характеристик цепи тройного Г-образного фильтра (рис. 1) путем нахождения передаточной функции операторным методом.

Данный алгоритм был приведен в статье доцента кафедры «Радиотехника» Петрушиной И. Б. и студента кафедры «Радиотехника» Калабина А. А. «К вопросу о расчете передаточной функции в радиотехнических цепях», в которой находились передаточная функция и частотные характеристики двойного Т-образного моста [5].

В схеме дано: $R_1 = R_2 = R_3 = R$, $C_1 = C_2 = C_3 = C$.

Передаточная функция цепи – это отношение изображения выходного сигнала к изображению выходного при нулевых начальных условиях.

$$K(P) = \frac{U_{\text{вых}}(P)}{U_{\text{вх}}(P)}. \quad (1)$$

Из схемы рис. 2. получаем

$$U_{\text{вых}}(P) = RI_3. \quad (2)$$

© Петрушина И. Б., Тихонов К. А., 2017

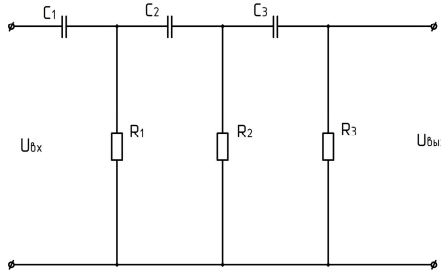


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема
тройного Г-образного фильтра высоких частот

Сопротивление на емкости обозначим Z:

$$Z = \frac{1}{PC}. \tag{3}$$

Найдем ток в третьем контуре. Для этого составим уравнения по методу контурных токов:

$$\begin{cases} I_1(Z+R) - I_2 R = U_{\text{вх}}, \\ I_2(Z+R+R) - I_1 R - I_3 R = 0, \\ I_3(Z+R+R) - I_2 R = 0, \end{cases}$$

$$\left(\begin{array}{ccc|c} Z+R & -R & 0 & U_{\text{вх}} \\ -R & Z+2R & -R & 0 \\ 0 & -R & Z+2R & 0 \end{array}\right),$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} Z+R & -R & 0 \\ -R & 2R+Z & -R \\ 0 & -R & 2R+z \end{vmatrix} =$$

$$= (Z+R)(2R+Z)(2R+Z) + (-R)(-R)\cdot 0 + (-R)(-R)\cdot 0 -$$

$$-0\cdot 0\cdot(2R+Z) - (-R)(-R)(2R+Z) - (-R)(-R)(Z+R) =$$

$$= (Z+R)(2R+Z)(2R+Z) - (R^2)(2R+Z) - (R^2)(Z+R) =$$

$$= (Z+R)(Z^2+4RZ+4R^2) - R^2Z - R^3 - 2R^3 - R^2Z =$$

$$= Z^3 + RZ^2 + 4RZ^2 + 4R^2Z + 4R^2Z + 4R^3 - R^2Z - R^3 - 2R^3 - R^2Z =$$

$$= Z^3 + 5RZ^2 + 6R^2Z + R^3.$$

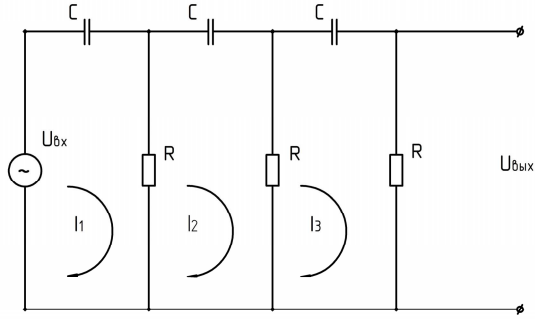


Рис. 2. Расчетная схема тройного Г-образного фильтра высоких частот

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} Z+R & -R & U_{вх} \\ -R & 2R+Z & 0 \\ 0 & -R & 0 \end{vmatrix} = R^2 U_{вх}.$$

$$I_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{R^2 U_{вх}(p)}{Z^3 + 5RZ^2 + 6R^2 Z + R^2}. \quad (4)$$

Выразим выходное напряжение из формулы (2), учитывая формулу (4):

$$U_{вых}(P) = \frac{R^3 U_{вх}(P)}{Z^3 + 5RZ^2 + 6R^2 Z + R^3}. \quad (5)$$

Найдем передаточную функцию по формуле (1), подставив в нее формулу (5):

$$K(P) = \frac{U_{вых}(P)}{U_{вх}(P)} = \frac{R^3 U_{вх}(P)}{\left(Z^3 + 5RZ^2 + 6R^2 Z + R^3\right) U_{вх}(P)} =$$

$$= \frac{R^3}{\left(Z^3 + 5RZ^2 + 6R^2 Z + R^3\right)} = \left| Z = \frac{1}{PC} \right| =$$

$$= \frac{R^3}{\left(\frac{1}{(PC)^3} + \frac{5R}{(PC)^2} + \frac{6R^2}{PC} + R^3\right)} = \frac{R^3}{\left(\frac{1}{(RPC)^3} + \frac{5}{(RPC)^2} + \frac{6}{RPC} + 1\right) R^3}.$$

Выразим комплексный коэффициент передачи, сделав замену $P = j\omega$:

$$K(j\omega) = \frac{R^3}{\left(\frac{1}{(j\omega RC)^3} + \frac{5}{(j\omega RC)^2} + \frac{6}{j\omega RC} + 1\right) R^3} = \frac{1}{\left(\frac{1}{-j(\omega RC)^3} + \frac{5}{-(\omega RC)^2} + \frac{6}{j\omega RC} + 1\right)} = \frac{1 + j \cdot 0}{\left(1 - \frac{5}{(\omega RC)^2}\right) + j\left(\frac{1}{(\omega RC)^3} - \frac{6}{\omega RC}\right)}.$$

Сделаем замену $RC = \tau$, где τ [с] – постоянная времени:

$$K(j\omega) = \frac{1 + j \cdot 0}{\left(1 - \frac{5}{(\omega\tau)^2}\right) + j\left(\frac{1}{(\omega\tau)^3} - \frac{6}{\omega\tau}\right)}. \quad (6)$$

Найдем формулуАЧХ, рассчитав модуль выражения (6):

$$\left|K(\omega)\right| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{5}{(\omega\tau)^2}\right)^2 + \left(\frac{1}{(\omega\tau)^3} - \frac{6}{\omega\tau}\right)^2}}. \quad (7)$$

Построим график АЧХ по формуле (7) для $R = 2$ кОм, $C = 0{,}05$ мкФ. Следовательно, $\tau = 10^{-4}$ [с]. Данные расчета приведены в табл. 1 (рис. 3).

Таблица 1. **Контрольные точки для построения графика АЧХ**

ω, рад/с	0	10^3	10^4	$10^{4{,}711}$	10^5	10^6
$\lvert K(\omega)\rvert$	0	10^{-3}	0,156	0,707	0,890	0,999

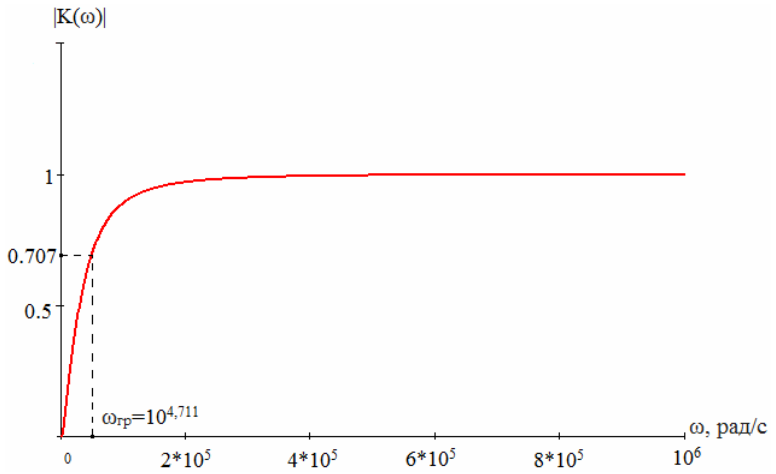


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика

Найдем формулуФЧХ, рассчитав фазу выражения (6):

$$\varphi(\omega)=\operatorname{arctg}\left(\frac{0}{1}\right)-\operatorname{arctg}\left(\frac{\dfrac{1}{(\omega\tau)^3}-\dfrac{6}{\omega\tau}}{1-\dfrac{5}{(\omega\tau)^2}}\right)=-\operatorname{arctg}\left(\frac{\dfrac{1-6(\omega\tau)^2}{(\omega\tau)^2}}{\dfrac{(\omega\tau)^2-5}{(\omega\tau)^2}}\right)=$$

$$=-\operatorname{arctg}\left(\frac{1-6(\omega\tau)^2}{\omega\tau\left((\omega\tau)^2-5\right)}\right)=\ -\operatorname{arctg}\left(\frac{1-6(\omega\tau)^2}{(\omega\tau)^3-5\omega\tau}\right). \qquad (8)$$

Построим график ФЧХ по формуле (8) для R = 2 кОм, C = 0,05 мкФ. Следовательно, $\tau = 10^{-4}$ [с]. Данные расчета приведены в табл. 2 (рис. 4).

Таблица 2. **Контрольные точки для построения графика ФЧХ**

ω, рад/с	10	10^3	$10^{3,611}$	10^4	$10^{4,302}$	$10^{4,334}$	$10^{4,711}$	10^6
φ(ω), рад	1,56	1,08	0	–0,90	–1,56	1,56	0,96	0,01

Приведенный в статье метод расчета частотных характеристик радиотехнических цепей используется при изучении дисциплины «Основы теории цепей» в ИжГТУ имени М. Т. Калашникова на кафедре «Радиотехника».

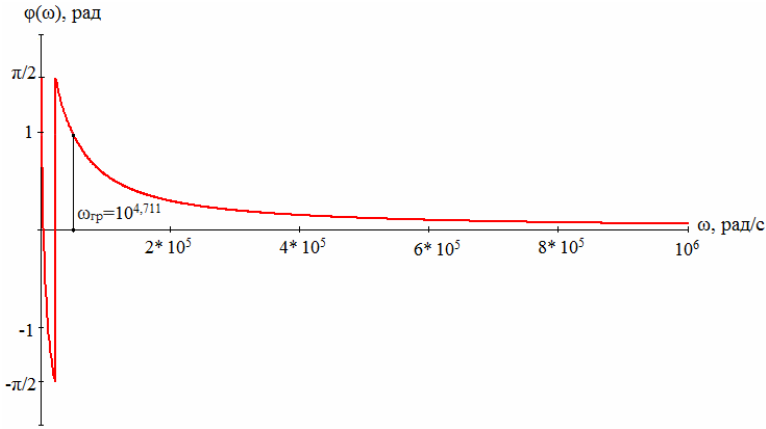


Рис. 4. Фазо-частотная характеристика

Список литературы

1. *Попов*, *В. П.* Основы теории цепей : учеб. – М.: Юрайт, 2013. – 687 с.

2. *Бакалов*, *В. П.* Основы анализа цепей / В. П. Бакалов, О. Б. Журавлева, Б. И. Крук – М. : Горячая Линия – Телеком, 2014. – 592 с.

3. *Бакалов*, *В. П.* Основы теории цепей / В. П. Бакалов, В. Ф. Дмитриков, Б. И. Крук. – М. : Горячая Линия – Телеком, 2013. – 596 с.

4. *Смирнов*, *Н. И.* Теория электрических цепей: конспект лекций / Н. И. Смирнов, В. В. Фриск. – М. : Горячая Линия – Телеком, 2016. – 270 с.

5. *Петрушина*, *И. Б.* К вопросу о расчете передаточной функции в радиотехнических цепях / И. Б. Петрушина, А. А. Калабин // Приборостроение в XXI веке – 2014. 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. 423–429.

The Problem of the Calculation of the Frequency Characteristics in the Radio-Engineering Circuit

The present paper proposes thecalculation algorithm for frequency characteristics in the radio-engineering circuitsby method of operators.

Keywords: frequency characteristics calculation; triple L-shaped high-pass filter; method of operators; radio-engineering circuit

УДК 654.165

Л. А. Сенаторов, студент
E-mail: swiftdruide@gmail.com
Е. М. Зайцева, кандидат педагогических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Использование средств радиосвязи в организации воздушного движения

Дается описание основных служб, обеспечивающих сопровождение и безопасность полетов, а также дается классификация и описание радиооборудования, размещенного в кабине пилота.

Ключевые слова: аэропорт; организация связи; средства связи

В настоящее время происходит быстрое развитие системы грузовых и транспортных авиаперевозок за счет внедрения современных средств радиотехники и связи в работу современных аэропортов. В связи с растущей загруженностью аэродромов и путей перемещения, роль радиосвязи в организации работы аэропортов возросла.

В ИжГТУ имени М. Т. Калашникова ведется подготовка студентов по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». При изучении дисциплины «История систем мобильной связи» возникла необходимость более подробно рассмотреть вопрос использования средств телекоммуникаций в работе современных авиапредприятий.

Целью данной работы является разработка электронной лекции, раскрывающей следующие вопросы:

– анализ существующих классификаций средств связи, используемых в работе современных аэропортов;

– изучение материалов по системе организации связи в аэропортах;

– изучение средств связи, размещенных в кабине пилота.

Под радиосвязью понимается разновидность электросвязи, при которой в качестве носителей сигнала используются радиоволны, т. е., электромагнитные волны, свободно распространяющиеся в среде.

Радиооборудование в зависимости от области применения работает на радиочастотах от 3кГц до 300 ГГц. В авиации используются частоты 100–150 и 200–400 МГц.

© Сенаторов Л. А., Зайцева Е. М., 2017

На первом этапе работы выполнен анализ информации, размещенной на официальных сайтах федерального агентства воздушного транспорта (Росавиации), а также поиск в учебной литературе и средствах массовой информации, размещенных в сети Интернет относительно анализа существующих классификаций средств связи, используемых в работе современных аэропортов [1–3].

В результате обработки найденной информации была составлена классификация используемых в аэропортах средств связи, представленная на рис. 1.

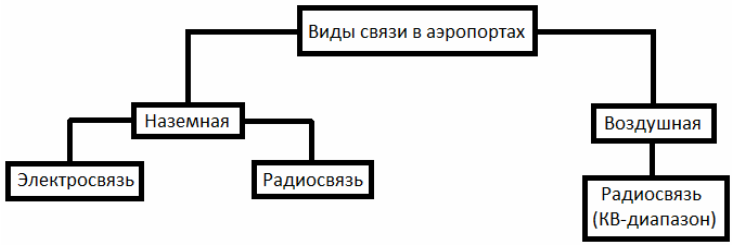


Рис. 1. Классификация средств связи, используемых в аэропортах

Наземная электросвязь представлена «Сетью авиационной фиксированной электросвязи», которая используется органами управления воздушным движением для приема и передачи аэронавигационной и метеорологической информации, планов полетов и прочей производственной информацией.

Наземная радиосвязь используется для организации связи между отдельными лицами и группами пользователей, работающих и ожидающих транспортных средств, а также для обеспечения радиолокационного контроля при управлении воздушным движением в районе аэродрома.

Во время полета пилоты используют радиосвязь в КВ-диапазоне для связи с другими воздушными суднами и аэродромами. Благодаря низким потерям при отражении от ионосферы, короткие волны распространяются на большие расстояния, что позволяет устанавливать четкую связь с отдаленными объектами.

Система организации связи в аэропортах представляет собой комплекс технических, программных и организационных служб, которые обеспечивают сопровождение и безопасность совершения полетов, который включает:

– службу организации воздушного движения, которая содержит рабочие места диспетчеров и все необходимое для их работы оборудование;

– службу электрорадиотехнического обеспечения полетов;

– службу электросветотехнического обеспечения полетов;

– метеорологическую службу;

– штурманскую службу;

– службу аэронавигационной информации.

Между собой эти службы связываются при помощи сети авиационной фиксированной электросвязи, которая организована как телеграфная сеть.

Служба электрорадиотехнического обеспечения полетов позволяет экипажам воздушных судов вести связь с землёй, определять свое местонахождения в той или иной системе координат и выдерживать заданные траектории маневрирования в районе данного аэродрома, а также выполнять заход на посадку, взлет и выход из района аэродрома. Это радиотехнический комплекс, включающий в себя радиостанции различных мощностей и диапазонов, радиолокационные станции, радиооборудование для захода на посадку, радиомаяки.

Наибольший интерес в данной работе представляет работа *службы организации воздушного движения*. Управление всеми действиями в аэропорту осуществляется авиадиспетчерами, которые должны обеспечивать безопасное, регулярное, упорядоченное и экономически выгодное движение воздушных судов. Для этого диспетчер использует в своей работе радиотехнические средства навигации, радиосвязи с экипажами воздушного судна, телефонной связи. Рабочее место авиадиспетчера оснащается компьютерами, которые выводят необходимую информацию, в том числе, информацию, получаемую из других служб управления полетами. Авиадиспетчер использует в своей работе информацию, отображающую воздушную и метеорологическую обстановку, сигнальные табло, графики, справочную и другую информацию.

Типовое оснащение *рабочего места диспетчера* представлено на рис. 2.

Заключительный этап работы включал сбор информации о техническом оснащении кабины пилота. Для этого по материалам сайтов [4] изучены основные виды аппаратуры связи, установленной в кабине пилота.

Радиоаппаратура располагается в различных частях воздушного судна, поэтому к ней предъявляются жесткие требования, такие как сохранение нормальной работоспособности в температурном диапазоне от –50 до +60 °С, относительной влажности воздуха 95 % и атмосферном давлении до 90 мм рт. ст. (1,34 ГПа). Приборы должны быть

защищены от коррозии, сохранять необходимую точность отсчета при работе днем и ночью, быть виброустойчивыми, иметь малую массу и габариты, простую конструкцию, быть удобными в эксплуатации. Радиосвязь является наиболее ценной, когда радиус ее действия равняется радиусу действия самолета.

Рис. 2. Оснащение рабочего места диспетчера: *1* – индикатор воздушной обстановки; *2* – панель связи; *3* – панель резервной связи; *4* – индикатор резервной системы «Альфа»; *5* – таблично-знаковый индикатор

В современных самолетах используются комбинированные многофункциональные индикаторы, дающие возможность пилоту одним взглядом охватывать все объединенные в нем индикаторы. Проекционный принцип индикации позволяет проецировать показания приборов на лобовое стекло самолета, совмещая их с панорамой внешнего вида.

Радиооборудование, которым оснащена кабина пилота, можно разделить на 4 группы. Классификация оборудования кабины пилота представлена на рис. 3.

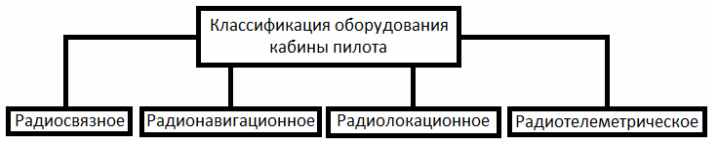


Рис. 3. Классификация радиооборудования в кабине пилота по функциональному назначению

Радиосвязное оборудование предназначено для обеспечения двухсторонней внешней связи между экипажами нескольких самолетов в полете и с наземными пунктами управления воздушным движением, двухсторонней внутрисамолетной связи между членами экипажа и передачи необходимой информации пассажирам самолета. Так, например, бортовая радиостанция Ягут-324 позволяет осуществлять двустороннюю связь между экипажами самолетов в воздухе и наземными службами обеспечения полетов [5].

Радионавигационное оборудование обеспечивает решение комплекса навигационных задач, а также посадку самолета в сложных метеорологических и ночных условиях.

Радиолокационное оборудование используется для повышения безопасности выполняемых полетов, определения координат различных наземных, наводных и воздушных объектов, их государственной принадлежности и т. д.

Радиотелеметрическое оборудование позволяет передать на борт самолета командную и получать контрольную информацию с самолета.

По результатам проведенного исследования разработана лекция в виде презентации по дисциплине «История систем мобильной связи». Данная лекция будет использоваться при подготовке студентов радиотехнических специальностей на кафедрах «Сети связи и телекоммуникационные системы» и «Радиотехника» ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова», а также при проведении профориентационной работы с выпускниками школ и средних специальных учебных заведений города Ижевска и Удмуртской Республики.

Список литературы

1. Федеральное агентство воздушного транспорта. – URL: http://www.favt.ru/ (дата обращения: 03.11.16).

2. Компания «Радиоцентр» – URL: http://www.radio-center.ru/blog/racii-i-radiostancii-dlya-aeroportov-i-aviakompaniy-po-vsemu-miru (дата обращения: 03.11.16).

3. Компания «Inflex». – URL: http://aftn-aero.info/termins_aftn.htm (дата обращения: 03.11.16).

4. Портал Aviar – Оборудование самолетов. – URL: http://aviair.ru/oborudivanie-samoletov/ (дата обращения: 03.11.16).

5. Научно-производственный центр «Полет». – URL: http://www.npp-polyot.ru/prod/prod_02_05.phtml (дата обращения: 03.11.16).

The Use of Radio Communication in Air Traffic Management

The article describes the main services that provide flight tracking and security, and also a classification and description of radio equipment placed in the pilot's cabin.

Keywords: airport; communication organization; communication

УДК 378.147.31

В. А. Сидорина, кандидат педагогических наук, доцент
E-mail: vasidorina@mail.ru
С. Г. Касимова, студентка
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Использование тестовых материалов для контроля знаний студентов направлений «Радиотехника» и «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Рассматриваются вопросы использования тестовых материалов для контроля знаний студентов направлений «Радиотехника» и «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Приведены примеры тестовых заданий.

Ключевые слова: контроль знаний студентов; тест; использование тестовых заданий

Тест является «простейшей формой контроля, направленной на проверку владения терминологическим аппаратом, современными информационными технологиями и конкретными знаниями в области фундаментальных и прикладных дисциплин» [1, с. 40].

С помощью тестовых материалов можно оперативно контролировать и объективно оценивать знания студентов как по отдельным видам работ (практические занятия, лабораторные работы), так и по нескольким темам или разделам дисциплины. Тестовые задания можно использовать не только в компьютерном, но и в письменном тестировании, которое дает возможность быть независимым от компьютера и на основе опыта его применения совершенствовать компьютерные тесты.

В настоящее время созданная база данных тестовых заданий на кафедре «Радиотехника» по дисциплинам «Информатика» и «Информационные технологии» постоянно корректируется и обновляется, проводится работа по совершенствованию с использованием компьютерных программ. Разработанные тесты использовались в текущем контроле для проверки знаний студентов по направлениям «Радиотехника» и «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» в 2011–2016 годах. Проведенный анализ результатов тестирования позволил выявить наиболее сложные, с точки зрения освоения студен-

© Сидорина В. А., Касимова С. Г., 2017

тами, лекционные темы и скорректировать учебный процесс по дисциплинам «Информатика» и «Информационные технологии».

Предлагаемые в данной работе тестовые задания по информатике могут быть полезны на лекциях, упражнениях и лабораторных работах тем преподавателям, которые применяют тестовые технологии обучения и контроля знаний.

На протяжении всего семестра регулярно проходит проверка знаний, усвоение учебного материала с помощью текущего контроля. Достоинство данного типа в том, что это происходит систематично и есть возможность использовать балльно-рейтинговую систему. Минусом же является фрагментарность и локальность проверки. Компетенцию целиком, а не отдельные ее элементы (знания, умения, навыки) при подобном контроле проверить едва ли возможно [1].

Данный тип контроля традиционно служит основным средством обеспечения в учебном процессе «обратной связи» между преподавателем и студентом, необходимой для стимулирования работы обучающихся и совершенствования методики преподавания учебной дисциплины [2].

Приведенный ниже комплект тестовых материалов относится к текущему контролю, который осуществляется преподавателем в процессе изучения студентами учебного материала.

Темы: Понятие языка высокого уровня Си, Си++.
Базовые типы данных.
Операторы ветвления и логические операции.
Вариант 1

1. К АРИФМЕТИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ В СИ ОТНОСИТСЯ
а) ++
б) = =
в) =
г) >=

2. ЦЕЛЫЙ ТИП В СИ ОПИСЫВАЕТСЯ С ПОМОЩЬЮ
а) float
б) double
в) int
г) void

3. ОПЕРАЦИЯ ЛОГИЧЕСКОЕ РАВНО В ЯЗЫКЕ СИ ЗАПИСЫВАЕТСЯ
а) =
б) ||

в) &&
г) = =

4. ВВОД С КЛАВИАТУРЫ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ С ПОМОЩЬЮ
а) printf ()
б) scanf ()
в) cout
г) goto

5. ОПЕРАЦИЯ «УСЛОВИЕ ? :»
а) реализует циклическую структуру
б) – это операция, имеющая 3 переменные
в) используется при подключении библиотеки conio.h
г) не используется в языке Си

6. НАХОЖДЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО ЗНАЧЕНИЯ ЦЕЛОГО ЧИСЛА
а) sqr (x)
б) abs (x)
в) ceil (x)
г) exp (x)

7. БИБЛИОТЕКА КЛАССОВ ДЛЯ ВВОДА ВЫВОДА – ЭТО
а) conio.h
б) stdio.h
в) iostream.h
г) ostream.h

8. НАЙДИТЕ СТРОЧКУ БЕЗ ОШИБКИ
а) printf (“%i”, &a);
б) scanf(“%i”, &a);
в) printf(“ответ равен”, a);
г) scanf(“введите a”, &a);

9. ДАННАЯ ЧАСТЬ ПРОГРАММЫ НА СИ НАХОДИТ СУММУ КВАДРАТОВ ЧИСЕЛ ОТ 1 ДО 10
а) for (i=1;s=0; i<=10; i++) s= (s)+i;
б) for (i=1;s=0; i<=10; i++) s=s+pov(i, 2);
в) for (i=1,s=0; i<=10; i++) s=s+i*i;
г) for (i=1;s=0; i<=10; i++) s=s+i*i;

10. ДЛЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ЦИКЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ В ЯЗЫКЕ СИ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ
а) оператор if
б) оператор switch
в) оператор goto
г) оператор while

Вариант 2

1. К АРИФМЕТИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ В СИ НЕ ОТНОСИТСЯ
а) &&
б) +
в) – –
г) –

2. ВЕЩЕСТВЕННЫЙ ТИП В СИ ОПИСЫВАЕТСЯ С ПОМОЩЬЮ
а) char
б) int
в) long int
г) float

3. ДЛЯ ПЕРЕХОДА НА СЛЕДУЮЩУЮ СТРОЧКУ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ
а) \n
б) \v
в) \a
г) \t

4. ВЫВОД НА ЭКРАН ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ С ПОМОЩЬЮ
а) cin
б) cout
в) scanf ()
г) return

5. ОПЕРАЦИЯ «+ +»
а) реализует циклическую структуру
б) – это операция с двумя переменными
в) используется только с подключением библиотеки stdio.h
г) применяется к одной переменной

6. ДЛЯ ОПЕРАТОРА ПРИСВАИВАНИЯ В СИ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ
а) =
б) :=
в) = =
г) >>

7. ДЛЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ВЕТВЛЕНИЯ В ЯЗЫКЕ СИ НЕ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ
а) оператор if
б) оператор switch
в) операция условие ? :
г) операция ++

8. НАЙДИТЕ СТРОЧКУ БЕЗ ОШИБКИ

а) if (a>b) max=a; else max=b;

б) if a>b max=a; else max=b;

в) if (a>b) max=a else max=b;

г) if a>b max=a else max=b;

9. ВЫБЕРИТЕ ПРАВИЛЬНУЮ СХЕМУ ЦИКЛА С ПАРАМЕТРОМ

а) for (выражение 1, выражение условия, выражение 3) тело цикла;

б) for (выражение 1; выражение условия; выражение 3) тело цикла;

в) for выражение 1; выражение условия; выражение 3 { тело цикла;}

г) for (выражение 1; выражение 2; выражение условия; выражение 3) тело цикла;

10. ОПЕРАЦИЯ ЛОГИЧЕСКОЕ УМНОЖЕНИЕ В ЯЗЫКЕ СИ ЗАПИСЫВАЕТСЯ

а) ||

б) <<

в) &&

г) !=

Матрица ответов

Вариант 1

1. а)	2. в)	3. г)	4. б)	5. б)	6. б)	7. в)	8. б)	9. в)	10. г)

Вариант 2

1. а)	2. г)	3. а)	4. б)	5. г)	6. а)	7. г)	8 а)	9. б)	10. в)

Особую сложность представляет разработка заданий на установление соответствия. Это такие задания, в которых необходимо установить соответствие содержания элементов одного множества элементам другого. Инструкция к заданиям такой формы формулируется следующим образом: «УСТАНОВИТЕ СООТВЕТСТВИЕ» [3].

Задания на установление правильной последовательности – это такие задания, в которых необходимо установить правильную последовательность элементов, действий. Задания данной формы проверяют алгоритмические знания, знание определений, понятий, что особенно важно в информатике, и позволяют формировать эти виды знаний в учебном процессе [3]. Задания формулируются с инструкцией: «УСТАНОВИТЕ ПРАВИЛЬНУЮ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ». Ответы пишутся или вводятся в пробелах строки «Ответы», при заполнении они выглядят так: 1Д, 2Б, 3В, 4Е [3].

На лекциях задания на установление соответствия позволяют проверить ассоциативные знания элементов не одного, а двух множеств. Они особенно полезны там, где нужно проверить знания формул, законов и соотношений. При составлении тестов по информатике такие задания используются при изучении алгоритмических языков.

Ниже приведены такие тестовые задания, которые используются для текущего контроля знаний на лекциях по некоторым темам дисциплин «Информатика» и «Информационные технологии».

Задания на установления соответствия.
Тема: алгоритмический язык Си

Установите соответствие:

1. *Базовый тип данных*	*Обозначение*
1) целый	А) short
2) символьный	Б) double
3) с плавающей точкой	В) int
4) пустой	Г) long
	Д) float
	Е) void
	Ж) char

Ответы: 1_, 2_, 3_, 4_.

2. *Арифметическая операция*	*Обозначение*
1) сложение	А) /
2) увеличение на единицу	Б) **
3) уменьшение на единицу	В) +
4) целая часть при делении	Г) + +
	Д) – –
	Е) – +
	Ж) % %
	З) %

Ответы: 1_, 2_, 3_, 4_.

3. *Операция отношения*	*Обозначение*
1) равно	А) =
2) не равно	Б) = =
	В) %=
	Г) !=
	Д) < >

Ответы: 1_, 2_.

4. *Логическая операция* *Обозначение*
1) логическое ..... И А) ||
2) логическое ..... ИЛИ Б) \\
3) логическое ..... НЕ В) //
..... Г) $$
..... Д) &&
..... Е) !!
..... Ж) !
Ответы: 1_, 2_, 3_.

5. *Операция* *Пример*
1) операция сдвига вправо ..... А) x=(a>b)?a:b;
2) операция сдвига влево ..... Б) if (a>b) a=0;
3) операция условие ?: ..... В) a=a>>2;
..... Г) d=d>1;
..... Д) x=x<<3;
Ответы: 1_, 2_, 3_.

Рассмотренный пример комплекта тестовых заданий применяется для текущего контроля знаний (проверка на лекциях, контроль на практических занятиях, при выполнении лабораторных работ и т. п.). Он относится к тематическому контролю и является необходимым элементом балльно-рейтинговой технологии учебного процесса.

На упражнениях, кроме бланковой формы тестовых заданий, используется компьютерный вариант тестов, который оперативно позволяет проверить знания студентов.

Естественно, что тесты – далеко не единственная форма контроля знаний, которая должна применяться в балльно-рейтинговой системе. Однако сочетание возможностей компьютерных технологий и достоинств тестирования вызывает у преподавателей повышенный интерес к разработке тестов, систем тестирования.

Список литературы

1. Методические рекомендации по проектированию оценочных средств для реализации многоуровневых образовательных программ ВПО при компетентностном подходе / В. А. Богословский, Е. В. Караваева, Е. Н. Ковтун, О. П. Мелехова, С. Е. Родионова, В. А.Тарлыков, А. А. Шехонин. – М. : Изд-во МГУ, 2007. – 148 с. – URL: http://window.edu.ru/resource/667/66667/files/Valuation.pdf (дата обращения 14.11.2016)

2. *Сидорина*, *В. А.* К вопросу о тестовом контроле знаний студентов направлений «Радиотехника» и «Телекоммуникации» в техническом универси-

тете / В. А. Сидорина, Е. М. Зайцева // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2011. – № 6. – С. 153–156.

3. *Сидорина*, *В. А.* Проектирование методического обеспечения в системе непрерывного профессионального образования на основе тезаурусного подхода : дис. … канд. пед. Наук. 13.00.08. ИжГТУ. – Ижевск, 2003 – 188 с.

Use of Test Materials for the Control of Students' Knowledge Areas ”Radio“ and ”Information and Communication Technologies and Communication Systems“

In the article the questions of usage of test materials for control of knowledge of students of the direction ”radio engineering“ and ”infocommunication technologies and communication systems“. Examples of test tasks.

Keywords: students knowledge control; test; he use of test tasks

УДК 378.147.31

В. А. Сидорина, кандидат педагогических наук, доцент
E-mail: vasidorina@mail.ru
А. О. Михайлова, студентка
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Формирование познавательной мотивации студентов радиотехнического профиля при использовании новых форм лекций в учебном процессе

Рассматривается формирование познавательной мотивации студентов радиотехнического профиля, которое способствует повышению качества подготовки студентов.

Ключевые слова: мотивация; лекция; формы лекции; учебный процесс

Лекцию следует оценивать не только с точки зрения научности, логичности и рациональности содержания, но и с позиции формирования познавательной мотивации студентов, их стремления к самостоятельному исследованию, влиянию на их духовное становлении личностного развития и развития общества с пониманием значимости этих процессов. Лекция, в соответствии с целями современного образования, должна создавать благоприятные условия для возможного развития личных качеств студента как потребителя информации, понимания культурных ценностей. От формирования мотивационной сферы зависит личная активность студента и успешность его обучения.

Познавательная мотивация студентов является обязательным элементом учебной деятельности. Это развивает у студентов ответственность, творческий подход к решению проблем учебного и профессионального уровня. Мотивация является эффективным способом улучшить процесс обучения на лекции. Мотивы являются движущими силами процесса обучения и усвоения знаний.

В лекциях традиционной формы, когда преподаватель преподносит информацию студентам, а студент слушает и записывает, существует ряд мотивационных недостатков, допускаемых преподавателем при преподнесении информации студентам.

1. **«Знания без объяснений».** Множество преподавателей стараются дать максимальное количество «голых» знаний без разъяснения их значимости. Студент – это не школьник, ему недостаточно сказать:

© Сидорина В. А., Михайлова А. О., 2017

«Так надо», – ему нужно объяснить, для чего это, и каким образом ему пригодятся эти знания в дальнейшей учебе и будущем. Ответ студенту: «В жизни все пригодится», – отбивает у него рвение, интерес к изучению данного предмета, после чего и происходит дальнейшее непонимание и незнание данного предмета и других дисциплин, которые как-либо связаны с этим предметом. Таким образом и формируется «клубок» незнаний, непониманий, долгов в учебе. Преподаватель максимально точно и без лишней «воды» должен предоставить свой предмет студенту для понимания и показать его значимость в их будущей деятельности. Ведь студент приходит в университет не только за знаниями, а еще чтобы стать высококлассным специалистом в будущей профессии.

2. **Отсутствие взаимоконтакта студент-преподаватель.** В большинстве традиционных, классических лекций между студентом и преподавателем отсутствует какой-либо контакт. Преподаватель читает лекцию, а студенты записывают. В такой ситуации очень важно чувствовать, что преподавателю важен каждый студент, что он готов помочь им в любой ситуации, разъяснить непонятные, даже самые глупые вопросы, по лекционным темам, чтобы у студента не было внутреннего страха.

3. **Отсутствие уважения к студентам.** Такой недостаток возникает особенно у преподавателей «старой школы», считающих своих студентов лентяями, сравнивающих их со студентами, которые были у них лет 10–20–30 назад, не понимая, что чаще всего у студентов просто не получается разобраться с предметом. Это отбивает интерес от получения «знаний без объяснений». Когда студент подходит к преподавателю с непонятным для себя вопросом, то может услышать: «Лучше нужно было слушать и записывать, в лекциях все есть, идите, учите». В этом случае мотивация к изучению данного предмета пропадает сразу. В независимости от того, какой студент, он в любом случае личность, которая хочет к себе соответствующего отношения. Но не стоит забывать, что преподаватель тоже личность и требует к себе соответствующего отношения.

Нет никакого более действенного способа повысить мотивацию студентов, как заинтересовать их своим предметом. Понятно, что в таком случае большинство студентов с удовольствием будут ходить на лекции, заниматься саморазвитием, готовиться к практическим занятиям и с успехом сдадут экзамен.

Эти недостатки могут быть успешно преодолены использованием не только традиционной формы лекции, но и различных инновационных новых форм лекций.

На лекциях чрезвычайно важен непосредственный контакт лектора с аудиторией. На лекции студент может сразу выяснить непонятное, уточнить неясное, получить ответы на интересующие его вопросы, чего невозможно получить в работе с «молчаливым» текстом. Наконец, под влиянием выразительности речи преподавателя, его речевой особенности и полученным знаниям студент формирует для себя представление о предмете. Лектор как человек говорящий может создать предпосылки для перехода студента из позиции человека слушающего в позицию человека слышащего, думающего, понимающего.

С развитием информатизации в Ижевском государственном техническом университете имени М. Т. Калашникова на кафедре «Радиотехника» стали активно использоваться лекции-визуализации, когда подготовка демонстрационных и методических материалов по чтению лекций происходит с использованием информационных технологий и мультимедийных средств [1, 2]. Такие лекции успешно позволяют 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, предложить иллюстративный материал. Проведенным нами опрос показал, что студенты знают и другие новые формы лекций, которые используются еще довольно редко.

Для формирования познавательной мотивации эффективно использование бинарной лекции или лекции вдвоем. Здесь учебный материал проблемного содержания дается в диалоге двух преподавателей или преподавателя и студента. Применение лекции вдвоем особенно актуально на младших курсах для развития у студентов умения вести диалог, развивать культуру ведения дискуссии.

На лекции моделируются реальные профессиональные ситуации, обсуждаются с разных позиций теоретические вопросы [1]. Предлагая подобную форму, хотелось бы подчеркнуть, что такая лекция рассматривается как межличностное общение. Считается, что специфика общения в отличие от других видов взаимодействия как раз и состоит в том, что в нем раскрываются психологические качества людей. В общении людей проявляются те свойства, которые характеризуют их как субъектов. Сказанное не означает, что в традиционных лекциях не проявляется личность преподавателя, однако лекция вдвоем обнаруживает личностные качества быстрее и ярче, что предъявляет повышенные требования к лекторам и их интеллектуальной и психологической совместимости: наличие развитых коммуникативных умений,

способность к импровизации, скорость реакции и высокий уровень владения лекционным материалом.

В 2015 году было проведено анкетирование студентов первого, второго и третьего курсов кафедры «Радиотехника» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова в возрасте от 17 до 20 лет. Выборка составила 60 человек. В ходе анкетирования было определено, какие формы лекций известны студентам и какие формы лекций используют преподаватели при обучении. Выявлено, что все 100 % студентов знакомы с лекцией-визуализацией, т. к. она успешно используется в учебном процессе на кафедре «Радиотехника». Лекция-консультация чаще применяется на третьем курсе, но студентам второго курса тоже известна эта форма. С бинарной лекцией наши студенты незнакомы, но высказали желание участвовать в таких лекциях. Лекция-конференция чаще всего применяется на первых курсах, на общих предметах, таких как «История», «Физика». 60 % студентов отметили, что проблемная лекция, начинающаяся с постановки проблемы, вопросов – это «Философия». Лекции с заранее запланированными ошибками знакомы студентам первого курса по лекциям «Информатика» и «Информационные технологии» [1].

В 2016 г. нами был проведен сравнительный анализ двух форм лекций: бинарной лекции и лекции с заранее заданными ошибками. Лекции проводились по дисциплинам «Информатика» и «Информационные технологии». Сравнительный анализ показал, что студенты активно воспринимают новое, сами участвуют в этих лекциях.

На лекциях вдвоем, студенты готовили отдельные блоки лекций по темам, которые заранее предлагались преподавателем, выступления предлагались небольшие, в пределах 15–20 минут. План выступления обсуждался преподавателем и студентом за неделю. С ролью лектора все студенты справились на «отлично». Проведение лекций с заранее заданными ошибками показало, что познавательная активность студентов была несколько выше, но студенты-лекторы испытывали определенную сложность при подготовке выступлений, т. к. эта форма используется очень редко.

В качестве примера рассмотрим лекцию с заранее заданными ошибками по теме «Алгебра логики, логические функции и логические операции» (первый курс, дисциплины «Информатика» и «Информационные технологии», первый семестр). Эта тема в школьном базовом курсе информатики практически не изучается, но этот блок важен не только в университетском курсе информатики, но и в дальнейшем, в радиотехнических курсах, например, в дисциплине «Микросхемотехника» (тема «Схемотехника логических элементов И-НЕ, ИЛИ-НЕ»

в разделе «Методы схемотехнического проектирования элементов цифровых ИС»).

В начале лекции лектор объявляет, что лекция будет с заранее заданными ошибками, которые необходимо найти во второй части лекции. В первой части лекции рассматривался новый материал, определены основные понятия логической функции, логических операций, построены таблицы истинности. Во второй части, когда приводились примеры и решались практические задачи, преподавателем был сделан ряд ошибок, студенты должны были найти эти ошибки. Ошибки были запланированы заранее, но доля экспромта присутствует в этой части по ходу лекции. Изложение лекции проводилось таким образом, чтобы ошибки были тщательно скрыты, и их не так легко можно было заметить. Задача студентов заключалась в том, чтобы ошибки отмечать по ходу лекции и в конце занятия их назвать. Созданная на такой лекции атмосфера доверия между преподавателем и студентами, личностное включение в процесс обучения повысили рост активизации познавательной деятельности студентов. Анализ ошибок развивает у студентов теоретическое мышление – вот главный результат проведения рассмотренного типа лекции.

В результате опроса были составлены две анкеты: анкета для преподавателей и анкета для студентов.

В дальнейшей работе планируется использование других инновационных типов занятий, таких как лекции с применением техники обратной связи, где вопросы задаются в начале и в к конце изложения каждого логического раздела лекции. Первая часть, чтобы узнать, насколько студенты осведомлены по излагаемой проблеме, вторая – для контроля качества усвоения материала. Обратную связь можно получить в результате устного опроса или с применением компьютерных тестов контроля.

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. 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. преп. и сотр. ИжГТУ имени М. Т. Калашникова (Ижевск, 13–15 апр. 2016 .). – Ижевск : Из-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. – С. 75–78.

The Formation of the Cognitive Motivation of Students in Radio Engineering in the Use of New Forms of Lectures in the Learning Process

The article discusses the formation of the cognitive motivation of students in radio engineering, which contributes to the quality of the students.

Keywords: motivation; lecture; lectures; educational process

УДК 621.391(04)

В. А. Сидорина, кандидат педагогических наук, доцент
E-mail: vasidorina@mail.ru
Е. И. Пастухова, студентка
И. С. Пастухов, студент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Проектирование сети радиодоступа по технологии *LTE* в коттеджном поселке «Сосновый Бор»

Рассматривается существующая мобильная сеть г. Ижевска и его пригорода, в ходе которого была выявлена необходимость построении сети на основе технологии LTE.

Ключевые слова: зона покрытия; радиосигнал; частотный диапазон; мобильная связь

Наиболее распространенным и перспективным видом связи в мире является мобильная связь. Современный мир уже нельзя представить без гаджетов (смартфонов, планшетов), которые позволяют легко связаться с другими абонентами, быстро найти нужную информацию в Интернете, насладиться просмотром фильмов. Сотовые телефоны и планшеты стремительно развиваются, с каждым годом на рынке появляются новые модели, новые функции, новые технологии и поддержка новых поколений, но и мобильная связь тоже не стоит на месте.

Первое поколение связи позволяло передавать только голос. За ним следовало второе поколение с востребованными услугами *sms* и *GPRS*. На смену второму поколению пришли сети третьего поколения, в которых передача данных преобладает над голосовыми услугами, но на сегодняшний день сети 3G достигли максимума своего развития, и пришло время более высоких скоростей, таких как сети четвертого поколения.

LTE – это перспективное поколение мобильной связи, имеющее высокую скорость передачи данных и отличное качество голосовой связи. Сети 4G могут работать практически в любом диапазоне частот от 704 до 2690 МГц. Возможности в сотовых сетях 4G, в первую очередь, будут ориентированы на мультимедиа возможности современных телефонов [1].

© Сидорина В. А., Пастухова Е. И., Пастухов И. С., 2017

Большим преимуществом технологий *LTE* является высокоскоростной интернет-доступ. Абонент сети *LTE* может быстро и удобно выходить в интернет со своего гаджета – сотового телефона, планшета, ноутбука и т. д.

Главными особенностями проектирования сетей *LTE* являются: сама архитектура технологии (в отличие от *GSM* и *UMTS* на сети нет привычных контроллеров базовых станций); прогнозируется долгая эволюциея и использование этих сетей благодаря инновационному способу высокоскоростной передачи данных [2].

В настоящее время сети *LTE* получили широкое распространение не только в городах, но и пригородной зоне. Отличный этому пример – город Ижевск, вокруг которого существует большое количество коттеджных поселков, в которых люди хотят иметь хорошую мобильную связь и высокоскоростной интернет.

В данной работе объектом для расширения сети *LTE* является коттеджный поселок «Сосновый бор», в котором необходимо предоставить жителям поселка высокоскоростной мобильный интернет и устойчивый радиосигнал сети *LTE*.

Главными задачами работы являются:

– выбор фрагмента сети (выбор места проектирования сети);

– расчет основных параметров (расчет зоны покрытия, расчет нагрузки в ЧНН, расчет емкости);

– выбор оборудования сети (выбор телекоммутационного оборудования).

В данной работе используются два варианта планирования сетей: формирование площади покрытия и обеспечение требуемой емкости.

В исследовательской работе рассмотрен один из вариантов организации беспроводного доступа в коттеджном поселке «Сосновый бор» с использованием технологии *LTE*.

В данной работе проведен анализ существующей сети г. Ижевска и его пригорода, в ходе которого выявлена необходимость построения сети на основе технологии *LTE*.

По результатам расчетов необходимо построить две базовые станции (одну 1800 диапазона для обеспечения емкости, другую 800 диапазона для обеспечения покрытия), количество которых было достаточным для первоначального запуска сети.

Для организации радиодоступа по технологии *LTE* в коттеджном поселке «Сосновый бор» проведен расчет зон покрытия радиосвязью. Радиус сот составил примерно 1,39 км для 1800 диапазона и 2,6 км для 800 диапазона. Проведено частотно-территориальное планирование

и показано ситуационное расположение базовых станций на территории коттеджного поселка «Сосновый бор».

Для обеспечения безопасности абонентов рассчитана зона ограничения застройки. Она получилась равной 15 м. Исходя из этого можно сделать вывод, что работа проектируемой системы не создает опасности для здоровья населения. Санитарно-защитная зона от работы приемо-передающих антенн отсутствует.

Поскольку оборудование сети *LTE* помещается в существующий контейнер-аппаратную, то это значительно уменьшает затраты на оборудование.

По результатам работы проектируемая сеть *LTE* будет отвечать всем требованиям.

Список литературы

1. *Тихвинский*, *В. О*. Сети мобильной связи LTE: технология и архитектура. – М. : Эко-Трендз, 2010. – 284 с.

2. *Гельгор*, *А. Л.* Технология LTE мобильной передачи данных : учеб. пособие. – СПб. : Изд-во политехн. ун-та, 2011. – 204 с.

Projection of Network of a Radio Access on LTE Technology in the Cottage Settlement of "Sosnovy Bor"

In article, the existing mobile network of Izhevsk and its suburb during which need creation of network on the basis of LTE technology has been revealed is considered.

Keywords: cover zone; wireless signal; the frequency range; mobile communication

УДК 631.396.6

К. А. Тихонов, студент
E-mail: kirill444enok@gmail.com
Н. А. Кудрявцев, студент
E-mail: kudryavcev.nikita97@gmail.com
Е. М. Зайцева, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Радиотехника»
E-mail: em_zaytseva@yahoo.com
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Разработка словаря пользователя программы схемотехнического моделирования *Micro-Cap 11*

Статья посвящена вопросу разработки интерактивного словаря пользователя программы Micro-Cap 11, который облегчает перевод с английского языка специальных терминов при проведении схемотехнического моделирования.

Ключевые слова: *Micro-Cap*; словарь пользователя; радиотехника; схемотехническое моделирование; основы компьютерного проектирования и моделирования

В ИжГТУ имени М. Т. Калашникова студенты направления подготовки 11.03.01 «Радиотехника» и специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» изучают дисциплину «Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных средств». В соответствии с требованиями ФГОС высшего образования студент должен изучить этапы проектирования радиоэлектронных средств и овладеть навыками работы в программах схемотехнического моделирования.

На кафедре «Радиотехника» при выполнении лабораторных работ и курсового проектирования используется программа *Micro-Cap*, обладающая большим количеством функций и возможностей для проектирования радиоэлектронных схем, является довольно сложной в использовании, особенно для начинающих. Проблемой в том, что студенческая версия программы *Micro-Cap-11*, используемая в учебном процессе, не русифицирована. Как показывает практика, знаний студентов не хватает для освоения программы в рамках учебных часов, что существенно снижает эффективность обучения.

По нашему мнению, имеется несколько путей решения этой проблемы. Прежде всего, это повышение уровня знаний студентов в об-

© Тихонов К. А., Кудрявцев Н. А., Зайцева Е. М., 2017

ласти английского языка. Следует отметить, что в рамках дисциплины «Английский язык» на втором курсе предусмотрено выполнение технического перевода и знакомство с профессиональными терминами, но этот путь, скорее, похож на долгосрочную перспективу, чем на безотлагательное решение проблемы.

Второй путь связан разработкой и использованием в учебном процессе методических пособий. К примеру, по данной дисциплине уже используются интерактивное учебное пособие для самостоятельной работы студентов [1] и база технических терминов, представленная в оболочке электронного словаря [2], и др. Но, как показывает практика, при курсовом проектировании и выполнении лабораторных работ, у студентов возникают трудности, связанные с переводом специальных терминов. Особенно видна эта проблема при работе с окнами выбора параметров моделирования схем электрических принципиальных.

Еще один возможный способ решения проблемы – использование русифицированных версий *Micro-Cap*. Однако на кафедре «Радиотехника» используют студенческую версию *Micro-Cap11*, в то время, как русификатор для этой версии не разработан на данный момент. Подобные русификаторы имеют ряд проблем, связанных с локализацией, т. к. созданы не разработчиками, а силами энтузиастов из интернета, активно использующих *Micro-Cap*.

Таким образом, целью данного исследования является разработка словаря пользователя *Micro-Cap 11*, использование которого не только обеспечит быстрое освоение специальных терминов, но и повысит качество подготовки студентов. На наш взгляд, данный вариант является не только самым простым и быстрым, но и наиболее продуктивным, т. к. студент вместе с полученными навыками работы в программе повысит свои знания в области английского языка. В основ данной методической разработки словарь пользователя, составленный для 9-й версии *Micro-Cap* в 2014 г. [3], а также использовалось учебное пособие М. А. Амелиной [4] и Г. Г. Галустова [5].

Словарь представляет собой базу данных, размещенную на нескольких листах книги *MicrosoftExcel*, содержащую поля: термин (англ.), перевод (рус.) и, где это возможно, клавиши быстрого доступа, графическое изображение. Для удобства пользования рабочие листы расположены в порядке изучения интерфейса программы, имеют определенные названия (основное меню, меню компонентов, опции, анализ и т. д.). Стартовая страница представляет собой главное меню, в котором указаны все разделы. Предусмотрено перемещение по разделам посредством технологии гиперссылок. На рисунке представлено главное меню словаря пользователя *Micro-Cap 11*.

Главное меню словаря пользователя *Micro-Cap 11*

По сравнению с работой 2014 г. в интерфейс словаря пользователявнесено ряд изменений. Во-первых, данный словарь создавался на основе 11-й версии *Micro-Cap*. Переработана структура меню: изменены разделы и добавлены новые (опции, анализ, окна,проектирование фильтров), значительно расширен раздел библиотек компонентов и введена удобная навигация по разделу. В словарь добавлены гиперссылки, позволяющие перейти на следующий лист, вернуться назад или же перейти в главное меню. Заполнены имеющиеся пропуски, исправлены ошибки, добавлены отсутствующие графические изображения. Доработан и более наглядно представлен перевод терминов меню анализа.

Для обучения работе с электронным словарем создан видео-урок с использованием программы *Bandicam*, в котором продемонстрированы основные разделы словаря, навигация по ним, поиск нужных специальных терминов при выполнении схемотехнического моделирования работы радиоэлектронных средств.

Разработанный информационный ресурс используется для выполнения лабораторных и курсовых работ, входит в методический пакет дисциплины «Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных средств», а также помогает успешному освоению специальной технической терминологии и закладывает основу для будущей успешной профессиональной деятельности студентов

направления подготовки 11.03.01 «Радиотехника» и специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

Список литературы

1. *Зайцева*, *Е. М*. Использование информационных технологий в процессе проектирования радиоэлектронных средств / Е. М. Зайцева, Н. А. Королев, А. С. Раев // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сб. материалов IV Всерос. науч.-техн. конф. асп., магистр. и молодых ученых с междунар. участием. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. – С. 315–317.

2. *Маркитонов*, *А. Ю*. Создание базы технических терминов, представленной в оболочке электронного словаря Anylexic / А. Ю. Маркитонов, А. А. Мальцева, А. Н. Копысов, Е. М. Зайцева // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сб. материалов III Всерос. науч.-техн. конф. асп., магистр. и молодых ученых с междунар. участием. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2015. – с. 317-320.

3. *Зайцева*, *Е. М*. Разработка словаря пользователя программы схемотехнического моделирования Micro-Cap / Е. М. Зайцева, Н. М. Зылева, А. А. Русинова // Измерения, контроль и диагностика : сб. материалов III Всерос. науч.-техн. конф. студ., асп.в и молодых ученых. – – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2014. – С. 195–197.

4. *Амелина*, *М. А*. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10 / М. А. Амелина, С. А. Амелин. – Смоленск : Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2013. – 618 с.

5. *Галустов*, *Г. Г*. Учебно-методическое пособие по курсу «Основы Компьютерного проектирования и моделирования РЭС» / Г. Г. Галустов, А. В. Кравец. – Таганрог : Изд-о ЮФУ, 2013. – 48 с.

Development of the User Dictionary of the Micro-Cap 11 Circuit Simulation Program

The article is devoted to the problem of development of interactive user dictionary for the Micro-Cap 11, which facilitates translation special terms from English in process of circuit simulation.

Keywords: Micro-Cap; user dictionary; radio engineering; circuit simulation; basics of computer design and modeling

УДК 621.396.96

А. Ю. Шаимов, студент
E-mail: shaimov-alex@mail.ru
А. Н. Копысов, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Радиотехника»
А. А. Богданов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника»
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Создание радиолокационной установки для оценки эффективной площади рассеяния

Рассказывается о такой физической характеристике, как «эффективная площадь рассеяния объекта» (ЭПР); рассмотрен принцип работы установки на базе National Instruments, измеряющей данную характеристику.

Ключевые слова: РЛС; ЭПР объекта; имитационный стенд; векторный генератор; векторный анализатор; измерение ЭПР

В настоящее время радиолокация получила широкие возможности применения для различных задач как гражданских, так в автомобилестроении. Все системы парковки работают на данном принципе. Радиолокационная аппаратура стала неотъемлемой частью оборудования корабля, самолета, диспетчерской аэродрома, метеостанции и т. д. Поэтому одной из задач современной инженерной промышленности является разработка устройства отслеживания объектов.

Цель работы – создать макет системы, позволяющей проводить оценку эффективной площади рассеяния. Но это планы, а на данный момент решается задача получения необходимых технических знаний в области обнаружения объектов.

Из теории известно, что радиолокационная заметность объекта зависит от его способности рассеивать или поглощать падающую на него энергию электромагнитной волны. Часть этой энергии поглощается, другая часть рассеивается в пространстве (возвращается обратно в виде сигнала на радиолокационную станцию). По прибытии данный сигнал обрабатывается и поступает на экран радиолокатора как отметки различной формы и яркости, показывающие отражающие характеристики цели.

Наиболее часто используемой на практике характеристикой является эффективная площадь рассеяния (ЭПР). Физически ЭПР определяется как площадь поперечного сечения гипотетического тела, которое

© Шаимов А. Ю., Копысов А. Н., Богданов А. А., 2017

будучи помещенным в точку расположения цели, рассеивает ту же мощность и создаёт такой же сигнал, что и реальная цель [1].

В простом случае математическая модель ЭПР записывается следующим образом [2]:

$$\sigma = \frac{\left(4\pi R^2\right) P_{\text{пр}}}{S_{\text{а}} D P_{\text{изл}}}, \qquad 1)$$

где R – расстояние от РЛС до цели; $P_{\text{пр}}$ – мощность на входе приёмника; $P_{\text{изл}}$ – излученная мощность приемника; D – коэффициент направленного действия антенны; $S_{\text{а}}$ – эффективная площадь антенны.

Стоит отметить, что ЭПР для определенного объекта зависит от его формы, размеров, материала изготовления, расположения относительно средства обнаружения (радиолокатора), от длины волны зондирующего его радиосигнала.

В теории (идеализированных случаях) рассматривается ЭПР точечных объектов, таких как [2]:

– выпуклая поверхность;
– плоская пластина;
– шар;
– уголковый отражатель (треугольный, четырехугольный);
– дипольный отражатель.

Подставляя среднее значение ЭПР реальной цели в основное уравнение радиолокации, можно рассчитать ожидаемую дальность действия системы.

Радиолокационные станции применяются для определения расстояния до какого-либо объекта. Простейшая локационная система состоит из антенны, индикатора, передатчика, коммутатора, приемника (рис. 1).

Передатчик является источником сигналов с достаточно высокой мощностью с частотой в диапазоне от 10^7 до 10^{11} Гц, которые с помощью антенны собираются в узкий луч. Сформированный луч направляется в сторону изучаемой цели (объекта), отраженная часть луча приходит обратно в приемник РЛС через принимающую антенну. Передающая часть излучает волны в виде коротких импульсов длительностью порядка 10^{-6} с. В промежутках между этими излучаемыми импульсами приемная часть радиолокатора улавливает отраженные от объекта импульсы и определяет интервал времени, затраченный сигналами на путь до объекта и обратно.

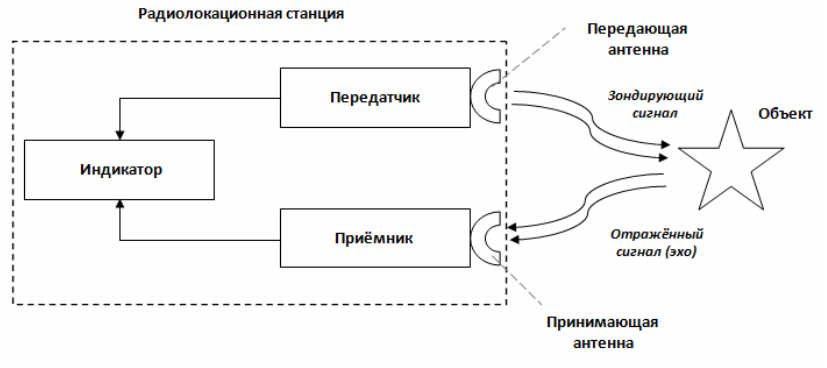


Рис. 1. Структурная схема РЛС

Рассмотрим макеты устройств, имеющиеся в наличии, для изучения принципов работы локационной системы, в том числе и оценки ЭПР.

Имитационный стенд для изучения принципов работы РЛС на высоких частотах (*National Instruments*) (рис. 2)

Рис. 2. Учебная система РЛС

Состав:

– промышленный встраиваемый контроллер на базе процессора IntelCore i7-2610QE с ОС Windows 7;

– шасси для установки встраиваемого контроллера и 7 модулей ввода/вывода сигналов;

– векторный анализатор PXIe-5663E ВЧ сигналов в диапазоне 6.6 ГГц с поддержкой режима аппаратной перестройки по несущей частоте [3];

– векторный генератор PXIe-5673E ВЧ сигналов в диапазоне 6.6 ГГц с поддержкой режима аппаратной перестройки по несущей частоте [4];

– передающая и принимающая антенна, передающая сигналы до 3 ГГц.

Описание работы установки и методика измерения

При помощи векторного генератора частоты генерируется необходимый информационный сигнал. Сформированный сигнал через передающую антенну ВГ излучается в направлении цели; отраженный сигнал передается в принимающую антенну ВА. Приемник и передатчик синхронизируются импульсом триггера, расположенного в ВГ. При возникновении импульсного сигнала триггера запускается обработка результатов на ВА. Схема работы установки показана на (рис. 3).

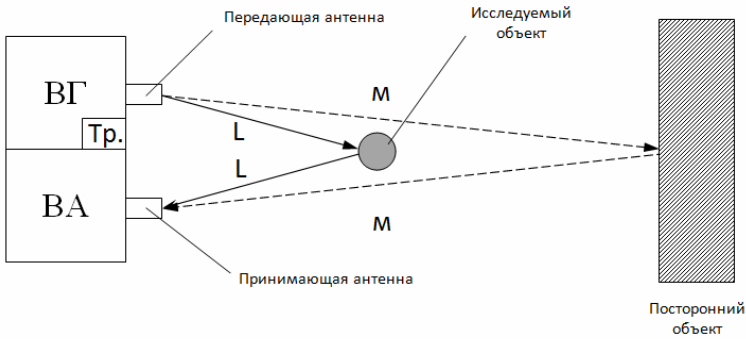


Рис. 3. Схема работы установки

Таким образом, время задержки между отправленным ВГ и принятым ВА сигналом составляет $t_{зад}$ (складывается из времени прохождения сигнала между антеннами и длительностью импульса триггера). Задержка между отправленным и принятым сигналом ВГ равняется: $t = 2 \cdot L/C$ (L – расстояние между передающей/принимающей антенной и объектом ≈ 6 м; C – скорость распространения электромагнитной волны в воздухе ≈ $3 \cdot 10^8$ м/с, t ≈ 0,04 мкс). Должно выполняться условие: $T < 2 \cdot L/C$ (T – длительность импульса триггера).

Стоит обратить внимание, что минимальное расстояние между антеннами и объектом должно составлять L_{min}; т. к. при меньшем расстоянии передача сигнала неосуществима (при излучении зондирующего сигнала прием отраженного сигнала невозможен); а максимальное расстояние L_{max} определено размерами учебной аудитории.

Следует отметить, что помимо сигнала, отраженного от объекта на вход приемника, может прийти сигнал, отраженный от стены (или другого предмета). Временная задержка такого сигнала $t_{ст} = 2 \cdot M/C$ (M – расстояние между антенной и стеной; C – скорость распространения электромагнитной волны в воздухе ≈ 12 м, $t \approx$ 0,08 мкс). Временные диаграммы процесса представлены на рис. 4.

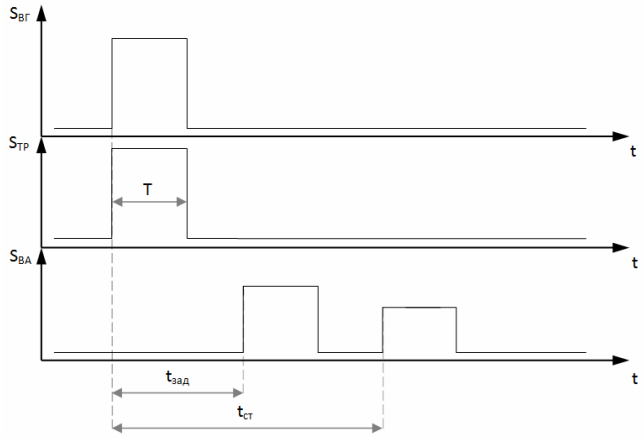


Рис. 4. Временные диаграммы процесса

Методика определения ЭПР заключается в анализе изменения амплитуды исходного сигнала ВГ и отраженного сигнала от объекта, дошедшего до ВА (при неизменной амплитуде передаваемого сигнала и в отсутствии помех) [5].

Выводы

Рассмотрен вариант имитатора РЛС на базе векторного генератора PXIe-5673E и векторного анализатора PXIe-5663E компании *National Instruments*, позволяющего производить анализ ЭПР исследуемого объекта. Изученная информация будет использоваться в дальнейшем как элементная база для создания РЛС установки и получения необходимых знаний и навыков в профессиональной сфере.

Список литературы

1. *Финкельштейн, М. И.* Основы радиолокации : учеб. для вузов. – 2-е изд. – М. : Радио и связь, 1983. – 536 с.

2. *Бакулев, П. А.* Радиолокационные системы : учеб. для вузов. – М. : Радиотехника, 2004. – 320 с.

3. NI PXIe-5663, NI PXIe-5663E. Vector Signal Analyzer. National Instruments. pp. 8. – URL: http://www.ni.com/pdf/products/us/cat_PXIe_5663.pdf (дата обращения: 17.11.2016).

4. NI PXIe-5673, NI PXIe-5673E. Vector Signal Generator. 2010 National Instruments. pp. 9. – URL: http://www.ni.com/pdf/products/us/cat_PXIe_5673.pdf (дата обращения: 17.11.2016).

5. Радиолокационные системы : учеб. / В. П. Бердышев, Е. Н. Гарин, А. Н. Фомин [и др.] ; под общ. ред. В. П. Бердышева. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т. – 2011. – 400 с.

The Creation of Radar to Evaluate the Effective Area of the Scattering

This article focuses on such physical characteristics as radar cross-section (RCS) and principle of operation of the plant on the basis of «National Instruments» that measures the given characteristic.

Keywords: radar, Radar cross-section (RCS), simulation stand, vector generator, vector analyzer, measurement of RCS

УДК 004.71:629.7

М. Ю. Шамонов, студент
E-mail: shmv.s.m.y@gmail.com
А. В. Абилов, кандидат технических наук, доцент
E-mail: albert.abilov@mail.ru, abilov@kth.se
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Мобильные самоорганизующиеся сети беспилотных летательных аппаратов *Flying Ad Hoc Networks* (*FANETs*)

Рассматриваются основные понятия и принципы работы сетей FANET (Flying Ad Hoc Network) на основе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Приводится информация оприменении сетей FANET в гражданской и военных сферах. Представлено сравнение сетей FANET с другими ad-hoc-сетями, такими как Mobile Ad Hoc Network (MANET) и Vehicular Ad Hoc Network (VANET). Кратко рассмотрены разновидности моделей FANET.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты (БПЛА); мультиагентная система; *Flying Ad Hoc Network* (*FANET*); мобильная самоорганизующаяся сеть; *Mobile Ad Hoc Network* (*MANET*); *Vehicular Ad Hoc Network* (*VANET*); узел сети

В последнее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят все большее число гражданских применений, таких как мониторинг и исследование местности, в полиции, структере Министерства чрезвычайных ситуаций и т. д. В дополнении к этому использование БПЛА играет важную роль и в военной сфере. Вместо того, чтобы использовать один большой БПЛА, в настоящее время активно внедряют использование группы таких беспилотных летательных аппаратов для получения более широкой зоны охвата и точности передаваемых данных. Таким образом, структура такой сети требует, чтобы позволить двум или более БПЛА общаться непосредственно между собой либо через другие узлы [1–6].

В основе сети, состоящей из группы мобильных агентов (в данном случае БПЛА), лежит принцип *мультиагентной системы*. Мультиагентная система включает в себя метод коллективного управления. Коллективом называют группу агентов, например, беспилотные лета-

© Шамонов М. Ю., Абилов А. В., 2017

тельные аппараты (БПЛА), решающих одну общую целевую задачу и взаимодействующих между собой для решения этой задачи. При этом коллективное взаимодействие охватывает большое число агентов системы и проявляется в их согласованных действиях. Метод коллективного управления заключается в том, что каждый БПЛА самостоятельно управляет процессом своего функционирования, т. е. определяет свои действия, а также согласовывает эти действия с другими агентами группы для наиболее эффективного, т. е. с минимальными затратами и максимальной выгодой для группы, решения целевой задачи.

Рассмотрим **преимущества** использования группы беспилотных летательных аппаратов над одиночным БПЛА:

Экономия: приобретение и затраты на обслуживание маленьких БПЛА намного дешевле, чем стоимость большого БПЛА.

Зона охвата: одиночный БПЛА имеет ограниченную зону охвата, мультиагентные системы БПЛА преодолевают это коллективным путем (чем больше группа, тем шире масштаб операции).

Работоспособность: при выходе из строя либо какой-нибудь неисправности одиночного большого БПЛА операция не может продолжаться, при потере функционала у одного из узла (БПЛА) мультиагентной системы группа продолжает свою миссию при помощи других БПЛА.

Скорость: скорость выполнения миссии гораздо выше при использовании группы БПЛА.

Стабильность: функционирование группы БПЛА стабильнее, чем одиночного БПЛА.

Маленькое радарное поперечное сечение: одиночный многогабаритный БПЛА создает большое радарное поперечное сечение в отличие от маленьких радарных сечений у группы БПЛА.

Однако помимо преимуществ мультиагентной системы БПЛА возникают и **проблемы**.

Структура сети: при использовании единственного БПЛА общение происходит между самим БПЛА и наземной станцией. Связь при таком общении довольно простая. При мультиагентной системе управления БПЛА общение также должно осуществляться с наземной станцией либо со спутником. Но по мере увеличения БПЛА в группе усложняется структура такой сети.

Аппаратные средства связи: для качественной связи между группой и базовой станцией каждый БПЛА должен быть оборудован дорогими аппаратными средствами связи.

Надежность коммуникации: из-за динамичности узлов сети и характера исследуемого ландшафта БПЛА могут не поддерживать линию связи.

Ограничение диапазона между БПЛА и наземной станцией: если БПЛА, отвечающий за связь с базовой станцией, выходит из ее видимости, то связь с группой БПЛА исчезает [7–14].

Решением проблем использования группы БПЛА является применение мобильной самоорганизующейся сети между БПЛА. Мобильные самоорганизующиеся сети между БПЛА носят наименование *FANET* (англ. *Flying Ad Hoc Network*). Структура такой сети состоит из подмножества БПЛА, где каждое подмножество осуществляет связь с базовой станцией, таким образом БПЛА могут общаться друг с другом и с наземной станцией.

FANET сети представляют собой частную форму сетей *MANET* (*Mobile Ad Hoc Network*) и *VANET* (*Vehicular Ad Hoc Network*). Структура сетей показана на рис. 1.

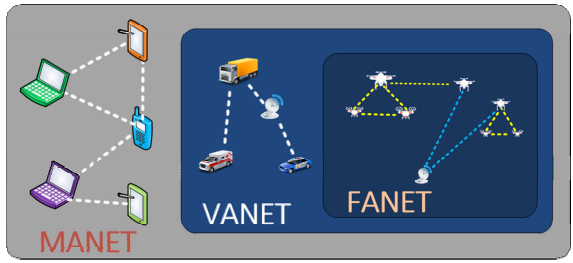


Рис. 1. Разновидности *ad-hoc*-сетей

Сети *MANET* представляют из себя самоорганизующуюся сеть между узлами (в качестве узла выступает сам человек либо его гаджет). Сети *VANET* – *ad-hoc*-сети между транспортом. Габариты узлов сетей имеют различия. В *FANETs*-сетях на основе беспилотных летательных аппаратов используются узлы (БПЛА) с маленькими габаритами, габариты узлов транспортных *ad-hoc*-сетей во много раз превосходят габариты *MANET*- и *FANET*-сетей. Отличия между тремя сетями представлены в табл. 1.

Подвижность узла. В сетях *FANET* (рис. 2) степень подвижности узлов (БПЛА) намного выше, чем в *VANET* и *MANET*. Скорость БПЛА варьируется в пределах 30–460 км/ч. Высокие скорости узлов усложняют проектирование *ad-hoc*-сетей на основе БПЛА.

Таблица 1. **Сравнение ad-hoc-сетей**

Критерии	Типы сетей		
	FANET	*VANET*	*MANET*
Подвижность узла	Высокая	Средняя	Низкая
Модель маршрута	Предопределенная заранее, но особенная для группы БПЛА	Стабильная (шоссе, трасса и т.д.)	Произвольная
Плотность сети	Низкая	Средняя	Низкая
Адаптируемость	Высокая	Средняя	Медленная
Радиомодель распространения	Высоко над уровнем земли (угол обзора доступен для большинства случаев)	Близко к земле (угол обзора не доступен для большинства случаев)	Максимально близко к земле (угол обзора не доступен для всех случаев)
Потребляемая мощность и автономность	Нуждаются в энергосберегающих протоколах связи	Не нуждаются	Нуждаются в энергосберегающих протоколах связи
Вычислительная мощность	Очень большая	Средняя	Ограниченная
Локализация	GPS, AGPS, DGPS, IMU	GPS, AGPS, DGPS	GPS

Модель маршрута. Узлы сетей *MANET* могут перемещаться только по определенной территории, узлы *VANET* передвигаются по шоссе либо трассе, в свою очередь, узлы сетей *FANET* осуществляют передвижение по воздуху. В *ad-hoc*-сетях на основе БПЛА маршрут передвижения может быть оговорен заранее либо отсутствовать вообще. Если маршрут составлен заранее, то он может быть нарушен ввиду экологических отклонений или операционных обновлений. После нарушения маршрута, он должен быть повторно вычислен для дальнейшего выполнения миссии группой БПЛА.

Плотность сети. Плотность сети представляет из себя среднее количество узлов на единицу площади. Плотность сетей *FANET* намного ниже плотности других сетей ввиду того, что расстояние между БПЛА в воздушном пространстве может достигать несколько километров.

Адаптируемость. Из-за высокой динамичности узлов *ad-hoc*-сетей на основе БПЛА изменение структуры сети происходит намного чаще, чем в мобильных и транспортных *ad-hoc*-сетях. Примером обновления топологии сети может служить отказ в работе одного из узлов группы, это приводит к перестроению структуры сети *FANET*.

Радио-модель распространения. Характер распространения радиосигнала между источником и приемником отличается в зависимости от выбора сети. Сети *VANET*, *MANET* располагаются невысоко над уровнем земли, поэтому линия видимости между источником и приемником отсутствует, и сильное влияние на передачу радиосигнала оказывает географическая структура (здания, природный ландшафт и т. д.). В сетях *FANET* на пути передачи сигнала помех возникает меньше вследствие того, что узлы сети располагаются высоко над уровнем земли и единственной помехой служит воздушное пространство. Поэтому сети *FANET* могут управляться дистанционно даже вне прямой видимости источника и получателя.

Потребляемая мощность и автономность. *Ad-hoc*-сети на основе беспилотных летательных аппаратов, как и *MANETs*, нуждаются в энергосберегающих протоколах связи. Габариты узлов сетей *VANET* позволяют обходиться без энергосберегающих протоколов.

Вычислительная мощность. Узлы *MANET*-сети, работающие от аккумуляторов (ноутбуки, планшеты, смартфоны и т. д.), ввиду своих компактных габаритов вынуждены быть ограничены в вычислительной мощности. *Ad-hoc*-сети на основе БПЛА и транспортные сети поддерживают устройства с высокой вычислительной мощностью.

Локализация. В сетях *FANET* требуются точные данные о местоположении за очень короткий интервал времени, поэтому данной сети помимо *GPS* требуются еще более быстрые и точные системы навигации.

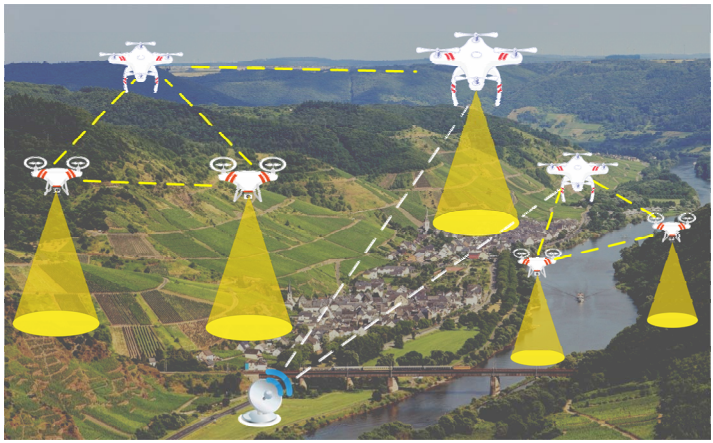


Рис. 2. Сценарий *FANET* сети на основе БПЛА

В зависимости от поставленной задачи перед группой БПЛА используются различные виды структуры сети *FANET*.

Сценарий развития при централизованном управлении данными представлен на рис. 3. Подобный вид структуры напоминает передачу данных по схеме «один-к-одному». Централизованная схема используется, когда обмен данными идет среди множества узлов при определенных алгоритмах. Преимущество заключается в скорости выполнения миссии.

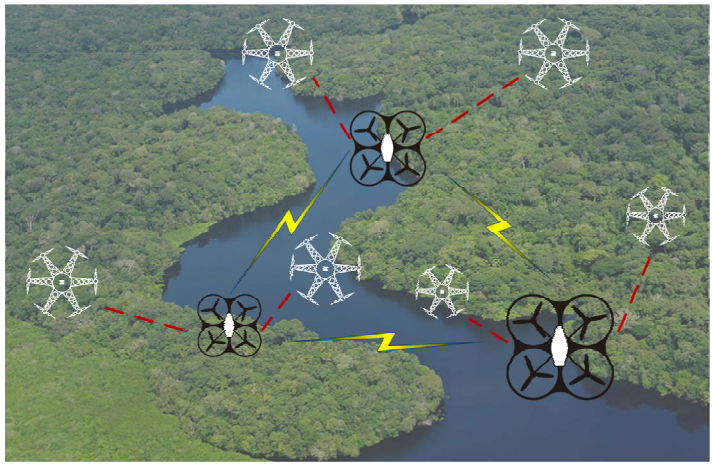


Рис. 3. Централизованная связь

На рис. 4 представлена многоуровневая иерархическая модель сети *FANET*. Данная структура применяется в том случае, когда работа БПЛА производится в разных областях миссии. У каждой группы есть главный узел. Группа под управлением главного узла может выполнять различные операции. Главный узел всегда должен поддерживать связь с наземной станцией для передачи данных, получаемых подгруппами, т. е. он должен быть в зоне видимости как групп, так и базовой станции. Применение иерархической структуры целесообразно, когда масштаб исследуемой местности огромен либо миссия проходит в труднодоступной местности.

Сети *FANET* как и все *ad-hoc*-сети сложны в построении маршрутизации. Для облегчения этого создается множество протоколов, которые упрощают архитектуру *ad-hoc*-сетей. На сегодняшний день открытыми остаются следующие проблемы *FANET*:

– коммуникация;
– ограничение воздушного пространства для гражданских БПЛА;
– надежные алгоритмы FANET;
– грузоподъемность БПЛА;
– стандартизация связи;
– координация БПЛА с другими объектами воздушного пространства.

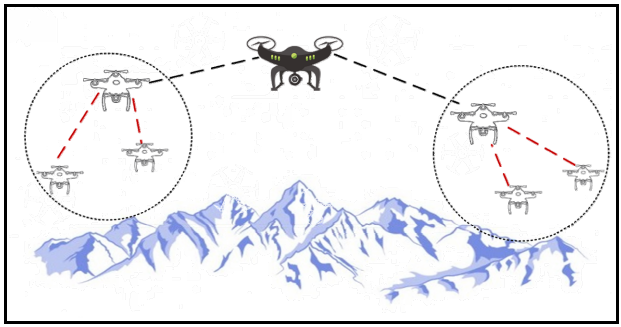


Рис. 4. Иерархическая связь

Для эффективного исследования труднодоступных местностей БПЛА требуют быстрой координированной связи друг с другом. Использование группы БПЛА облегчает и ускоряет процесс миссии во много раз, чем использование одиночных БПЛА. Но при создании такой мультиагентной системы управления остается самая главная проблема – коммуникация сети.

В данной статье были приведены основные виды архитектур *ad-hoc*-сетей на основе БПЛА. Проведено сравнение *FANET* сетей с другими *ad-hoc*-сетями. Задача статьи заключалась в определении главных проблем при создании сетей *FANET*. Целью для научного сообщества в сфере *ad-hoc*-сетей является решение проблем *FANET* путем создания новых протоколов связи, использовании современного и качественного оборудования для беспилотных летательных средств, разработка новых моделей антенн для БПЛА. Кроме этого, создание новых алгоритмов маршрутизации с целью повышения качества передаваемых данных остается не менее актуальной задачей для сетей типа *FANET*.

Список литературы

1. *Bekmezci*, *O. K*. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Survey / O. K. Bekmezci, S. Temel. Sahingoz // Ad Hoc Networks. – 2013. – Vol. 11, № 3. – Pp. 1254–1270.

2. Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов / К. С. Амелин, Е. И. Антал, В. И. Васильев, Н. О. Граничина // Стохастическая оптимизация в информатике. – 2009. – Вып. 5. – С. 158–162.

3. *George*, *P. B. J.* Search strategies for multiple UAV search and destroy missions / P. B. J. George, J. Sousa Sujit // Journal of Intelligent and Robotics Systems. – 2011. – 61. – Pp. 355–367.

4. BorderSense: border patrol through advanced wireless sensor networks / Z. Sun, P. Wang, M. C. Vuran, M. Al-Rodhaan, A. Al-Dhelaan, I. F. Akyildiz // Ad Hoc Networks. – 2011. – 9 (3). – Pp. 468–477.

5. Wildfire monitoring using a mixed air-ground mobile network / C. Barrado, R. Messeguer, J. López, E. Pastor, E. Santamaria, P. Royo // IEEE Pervasive Computing. – 2010. – 9 (4). – 24–32.

6. UAV relay network to support WSN connectivity // E. P. de Freitas, T. Heimfarth, I. F. Netto, C. E. Lino, C. E. Pereira, A. M. Ferreira, F.R. Wagner, T. Larsson // ICUMT, IEEE. – 2010. – Pp. 309–314.

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. – Т. 6. – № 7. – С. 141–145.

8. *Чунаев*, *А. В.* Влияние характеристик передачи потоковых данных на качество видео в WLAN / А. В. Чунаев, А. В. Абилов, А. И. Нистюк // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – Т. 6. – № 7. – С. 219–224.

9. *Васильев*, *Д. С.* Экспериментальное исследование качества передачи видео в древовидной P2P сети с алгоритмом ARQ прикладного уровня / Д. С. Васильев, А. В. Чунаев, А. В. Абилов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2014. – Т. 8. – № 1. – С. 10–14.

10. *Абилов*, *А. В.* Повышение качества передачи потоковых данных в сетях БПЛА с помощью PULL-PUSH-подхода / А. В. Абилов, Д. С. Васильев // Инфокоммуникационные технологии. – 2014. – Т. 12. – № 4. – С. 45–50.

11. *Чунавев*, *А. В.* Алгоритм AL-ARQ для потоковой доставки видеоданных в беспроводной локальной сети / А. В. Чунавев, А. В. Абилов, М. М. Павлова // Инфокоммуникационные технологии. – 2015. – Т. 13. – № 1. – С. 68–73.

12. *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.

13. *Емельянов*, *В. Н.* Применение адаптивных алгоритмов управления с использованием временного окна для передачи потоковых данных / В. Н. Емельянов, А. В. Абилов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – Т. 6. – № 7. – С. 85–90.

14. *Ревило*, *О. А.* Алгоритмы оценки потерь пакетов с адаптацией по выборке для сетей передачи потоковых данных / О. А. Ревило, В. Н. Емельянов, А. В. Абилов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – Т. 6. – № 7. – С. 161–164.

Mobile Self-Organizing Networks of Unmanned Aerial Vehicles – Flying Ad Hoc Networks (FANETs)

The article deals with the basic concepts and principles of FANET networks (Flying Ad Hoc Network) based on unmanned aerial vehicles (UAVs). FANET resulting from the use of networks in the civil and military spheres. A comparison FANET network with other peer networks, such as, Mobile Ad Hoc Network (MANET) and Vehicular Ad Hoc Network (VANET).

Keywords: unmanned aerial vehicles (UAVs); multi-agent system; Flying Ad Hoc Network (FANET); ad-hoc; Mobile Ad Hoc Network (MANET); Vehicular Ad Hoc Network (VANET); the network node

УДК 62-503.510

А. А. Юрков, студент
E-mail: uralexup@gmail.com
А. С. Жихарев, студент
E-mail: rash007@bk.ru
Е. С. Тенсин, студент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Моделирование системы управления с использованием ПИД-регулятора в системе *MATLAB*

Рассматривает работу пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора, особенности его использования и моделирования. В системе MATLAB была построена модель системы управления с использованием ПИД-регулятора, исследованы ее параметры.

Ключевые слова: система управления; ПИД-регулятор; пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор

Пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор – это часть устройства управления с обратной связью, которая осуществляет поддержание значение заданного параметра на необходимом уровне. Другими словами, регулятор формирует сигнал и поддерживает его значение на заданном уровне при условии воздействия на него побочных различных дестабилизирующих факторов. Выходной сигнал является суммой трех составляющих:

1. Пропорциональная составляющая, представляющая из себя разность входного и выходного сигналов.

2. Интегральная составляющая – интеграл разности сигналов.

3. Дифференциальная составляющая – производная разности сигналов.

Именно эти составляющие и формируют аббревиатуру ПИД.

Функциональная схема ПИД-регулятора представлена на рис. 1. В зависимости от поставленной задачи некоторые составляющие могут не использоваться. Соответственно, название будет формироваться из использующихся составляющих: пропорционально-дифференцирующий, пропорционально-интегрирующий и т. д.

Рассмотрим вклад каждой составляющей, вносимый в формирование управляющего сигнала.

© Юрков А. А., Жихарев А. С., Тенсин Е. С., 2017

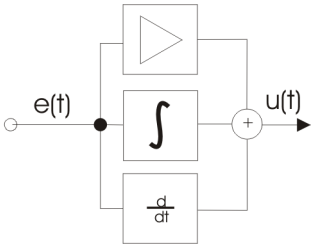


Рис. 1. Функциональная схема ПИД-регулятора

Пропорциональная составляющая определяется разностью входного и выходного значений, следовательно, она вырабатывает значение, компенсирующее отклонение выходного сигнала от заданного. Если уровень выходного сигнала равен уровню входного, составляющая равна нулю.

Очевидно, что при использовании только одного лишь пропорционального регулятора выходное значение не стабилизируется. Это связано с понятием статической ошибки регулирования, которая определяется точностью задания значения и изменением скорости значения. Также большие погрешности будут вносить различные внешние факторы.

Следующая составляющая – интегрирующая. Именно эта составляющая учитывает статическую ошибку. Однако при неверном выборе коэффициентов регулирования эта составляющая может приводить к автоколебаниям, а следовательно и к возбуждению системы.

Последняя составляющая – дифференцирующая. Представляя из себя производную разности сигналов, эта составляющая предсказывает изменение функции. Она также уменьшает скорость изменения сигнала при приближении значения сигнала к заданному.

Для цифровых систем уравнение ПИД-регулятора принимает следующее значение:

$$U(n) = U(n-1) + K_p\left(E(n) - E(n-1)\right) + K_i^{discr} E(n) + \\ + K_d^{discr}\left(E(n) - 2E(n-1) + E(n-2)\right), \quad (1)$$

где $U(n)$ – выходные значения; $E(n)$ – входные, K_p, K_i^{discr}, K_d^{discr} – коэффициенты пропорциональности. Коэффициенты K_p, K_i^{discr}, K_d^{discr} – проще всего выбрать опытным путем, но существуют специальные алгоритмы вычисления данных коэффициентов.

Построим простейшую модель *системы управления с ПИД-регулятором в среде MATLAB* Simulink (рис. 2).

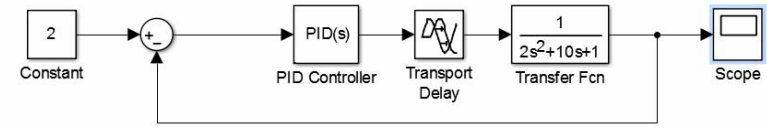


Рис. 2. Модель системы управления с ПИД-регулятором

Модель состоит из следующих элементов:
– блок, задающий входное значение;
– ПИД-регулятор;
– блок, осуществляющий задержку;
– блок, который эмитирует изменение функции по какому-то закону;
– осциллограф.

Установим следующие коэффициенты ПИД-регулятора: *proportional* (*P*) равен 6, *integral* (*I*) равен 1 и *derivative* (*D*) равен 4. При данных коэффициентах изменение выходного сигнала показано на рис. 3, из которого видно, что после непродолжительного переходного процесса выходное значение становится стабильным и принимает установленное первым блоком значение 1.

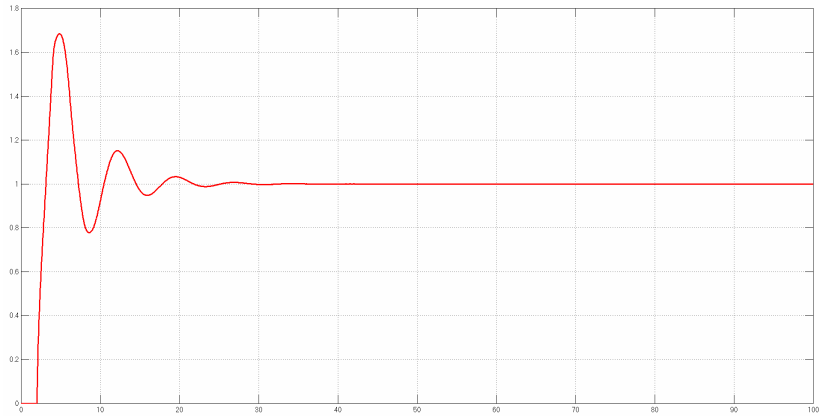


Рис. 3. Выходной сигнал системы управления

Также в блоке *PID*(*s*), нажав на кнопку *Tune*, есть возможность автоматического расчета коэффициентов. Подбирая значения времени

отклика (*response time*) и значение характеристик переходного процесса (*transient behavior*), можно добиться минимальных значений времени установления и нестабильностей (рис. 4).

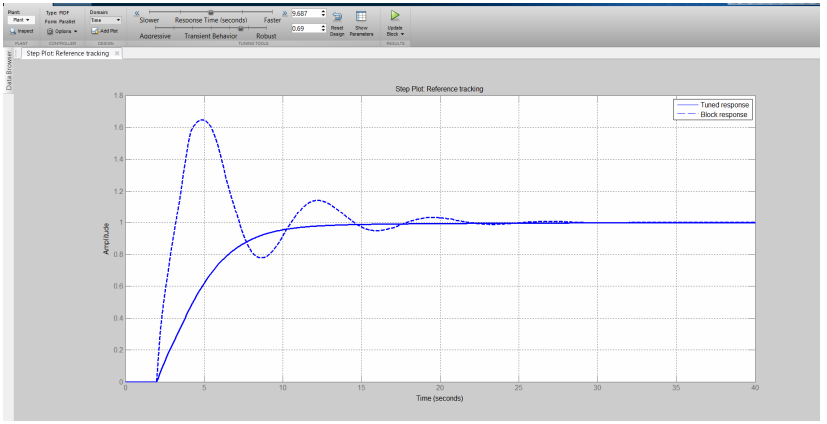


Рис. 4. График изменения выходного сигнала: прерывистая линия – при коэффициентах, подобранных опытным путем; сплошная линия – при коэффициентах, рассчитанных программой при заданных *response time* и *transient behavior*

Оценить характеристики процессов при различных коэффициентах, можно непосредственно оценив параметры двух кривых, нажав на кнопку *Show parametrs* в левом верхнем углу (рис. 5).

	Tuned	Block
P	2.1037	6
I	0.19809	1
D	0.68521	4

Performance and Robustness

	Tuned	Block
Rise time	5.77 seconds	0.977 seconds
Settling time	12.6 seconds	20.7 seconds
Overshoot	0 %	64.7 %
Peak	0.999	1.65
Gain margin	11.8 dB @ 0.84 rad/s	3.2 dB @ 0.958 rad/s
Phase margin	69 deg @ 0.206 rad/s	30.4 deg @ 0.606 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Рис. 5. Параметры сигналов при коэффициентах, подобранных опытным путем и рассчитанных программой

Из рис. 5 видно, что время установления для процесса при коэффициентах, рассчитанных программой, в два раза меньше, а нестабильности отсутствуют. Пользоваться программой для расчета коэффициентов очень удобно, но зачастую в реальных условиях просто невозможно описать ту функцию, по которой выходной сигнал будет изменяться, или она постоянно меняется под воздействием каких-либо внешних факторов.

Похожая система была реализована для поддержания постоянного напряжения питания в гальванически развязанной цепи. ПИД-регулятор реализован в цифровом виде на микроконтроллере. Он записывает значение в регистр, который определяет длительность импульса встроенного генератора, после чего этот сигнал поступает на импульсный трансформатор. В нем напряжение на выходной обмотке пропорционально длительности импульсов, поступающих на входную. Далее в гальванически развязанной цепи напряжение оцифровывается при помощи ЦАП и по последовательному интерфейсу поступает снова в микроконтроллер, тем самым образуя обратную связь.

Подводя итог, можно сказать, что ПИД-регулятор хорошо подходит для управлением процессами, в которых необходимо обеспечить достаточную стабильность. Также он отлично подходит для управления роботами, например, для поворота какой-либо подвижной его части или управления полетом беспилотного летательного аппарата.

Список литературы

1. *Олсон*, *Г.* Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олсон, Дж. Пиани. – СПб. : Невский Диалект, 2001. – 557 с.

2. *Гостев*, *В. И.* Системы управления с цифровыми регуляторами : справ. – К. : Тэхника, 1990. – 280 с.

3. *Воронов*, *А. А.* Теория автоматического управления. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1986. – 504 с.

Simulation of Control System Using PID Controller in MATLAB

This article considers the work of units of proportional-integral-derivative controller (PID controller) and its features of using and simulating. System of control using PID controller was constructed in MATLAB.

Keywords: system of control; PID controller; proportional-integral-derivative controller

Секция 5. **Физические методы в приборостроении**

УДК 502.656

В. А. Алексеев, доктор технических наук, профессор
Н. А. Девятов, аспирант
В. П. Усольцев, кандидат технических наук, ведущий инженер-электроник
С. И. Юран, доктор технических наук, профессор
E-mail: alekseevv@istu.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Оптоэлектронное устройство устранения аварийных сбросов на промышленных предприятиях в сточных водах

Для обнаружения аварийного сброса необходим контроль сточных вод в реальном масштабе времени, что может быть реализовано с использованием оптических методов исследования жидкости. Из анализа спектральных характеристик различных веществ можно выделить характерные частоты для каждого из них. Предлагаемое устройство устранения аварийных сбросов выполняет функцию идентификации веществ для растворов нескольких аварийных сбросов.

Ключевые слова: аварийный сброс; загрязнение; сточные воды; оптические схемы контроля; оптоэлектронный датчик; устранение аварийного сброса

Современные промышленные предприятия значительно сократили количество загрязняющих веществ в сточных водах. Они образуются в результате технологического процесса, который значительно сокращает за счет фильтрации вещества, направляемые в сточные воды [1, 2].

Однако оборудование, используемое в техпроцессе, исходные материалы и вещества для обеспечения техпроцесса требуют создания складов для хранения, транспортировки многих веществ, которые при нормальном техпроцессе не могут попасть в сточные воды предприятия. Но при аварийной ситуации на предприятии, при которой происходит разгерметизация емкостей и трубопроводов, хранимые вещества в виде аварийного сброса могут попасть в сточные воды.

© Алексеев В. А., Девятов Н. А., Усольцев В. П., Юран С. И., 2017

Аварийный сброс представляет собой сгусток неоднородной жидкости, содержащей загрязняющие вещества, у которого оптическая плотность на определенном ограниченном интервале времени отличается от оптической плотности контролируемой среды. Такие сгустки могут возникать только в аварийной ситуации, при которой, например, разгерметизируется какое-либо оборудование на объекте контроля, приводящей к сбросу загрязняющих веществ в систему стоков и фильтрации, которая, как правило, не предназначена для очистки воды от этих веществ. При наличии в системе фильтров последние могут выйти из строя или не полностью отфильтровать загрязняющие вещества, что приведет к проникновению их в окружающую среду (водоем).

Для обнаружения аварийного сброса необходим контроль сточных вод в реальном масштабе времени, что может быть реализовано с использованием оптических методов исследования жидкости [3].

Среди известных оптических схем контроля выделяются спектральные методы анализа, предполагающие построение спектральной характеристики изучаемой жидкости. Однако это требует значительных временных затрат, что не позволяет реализовать режим реального времени.

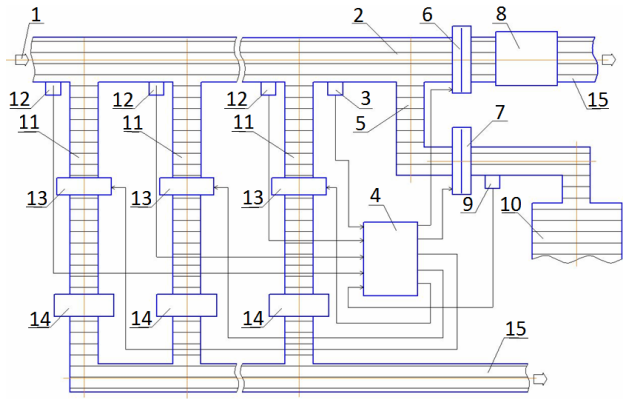


Рис. 1. Функциональная схема устройства устранения аварийного сброса

Поэтому предлагается использовать априорные сведения о спектральных характеристиках предполагаемых веществ в аварийных сбросах. Если ввести предположение, что вероятность смешивания нескольких аварийных сбросов ничтожно мала, то из анализа спек-

тральных характеристик различных веществ – потенциальных аварийных сбросов – можно выделить характерные частоты для каждого из веществ. Это позволит составить спектральный портрет для каждого из веществ в виде одной-двух спектральных частот.

После анализа портретов всех веществ, характерных для аварийного сброса, возможно определить характеристики датчиков для контроля каждого из веществ отдельно. Для устранения аварийных сбросов из общей сточной системы (канала) необходимо создать ряд ответвлений от основного канала для направления обнаруженных аварийных сбросов в отстойники или в каналы с фильтрами, настроенными на удаление вещества сбросов.

Устройство, реализующее данную схему устранения аварийного сброса, представлено на рис. 1 [4]. Устройство содержит контролируемую среду *1*; канал *2* движения контролируемой среды, например, трубопровод; первый оптоэлектронный датчик *3*, установленный в канале *2* и состоящий как минимум из одного источника и одного приемника излучения; блок обработки и управления *4*, например, на базе микроконтроллера, связанный с первым оптоэлектронным датчиком *3*; отвод (ответвление) *5* от канала *2*, расположенный после места установки первого оптоэлектронного датчика *3*; элементы *6*, *7* блокировки движения контролируемой среды, например, задвижки, установленные в канале *2* и отводе *5* соответственно, причем элемент *6* расположен после места расположения отвода, а управляющие входы элементов *6* и *7* соединены с первым и вторым выходами блока обработки и управления *4*; фильтр очистки *8*, установленный на выходе канала движения контролируемой среды; на выходе отвода *5* после элемента блокировки *7* установлены второй оптоэлектронный датчик *9*, соединенный со вторым входом блока обработки и управления *4*, и блок *10* утилизации загрязненной контролируемой среды. Перед отводом *5* установлены дополнительные отводы *11*, каждый из которых снабжен оптоэлектронным датчиком *12*, связанным с блоком обработки и управления *4*. Каждый дополнительный отвод *11* снабжен элементом блокировки контролируемой среды *13*, соединенным с блоком обработки и управления, и дополнительным фильтром очистки *14*. В блоке обработки и управления *4* установлены значения эталонной оптической плотности контролируемой среды и допустимые отклонения от нее. Эти отклонения контролирует первый оптоэлектронный датчик *3*. Кроме этого в блоке *4* хранятся значения оптических плотностей компонентов среды возможных для данного объекта контроля загрязнителей. Значения этих оптических плотностей и возможные отклонения от них контролируют оптоэлектронные датчики *12*. Выбор эталонного значения

оптической плотности каждого компонента возможного аварийного сброса с последующим его запоминанием в блоке *4* производится на основе спектрального анализа данного компонента и определения той длины волны оптического излучения, на которой оптическая плотность исследуемого компонента максимальна.

Устройство работает следующим образом. В процессе мониторинга в блоке *4* производится непрерывное сравнение текущей оптической плотности среды, полученной в результате обработки сигналов, поступающих с первого оптоэлектронного датчика *3* и оптоэлектронных датчиков *12*, с эталонной оптической плотностью контролируемой среды. В нормальном состоянии, когда оптическая плотность среды не превышает допустимого порогового значения, задвижка *6* открыта, а задвижка *7* закрыта. При этом контролируемая среда, например, вода, проходя через фильтр очистки *8*, поступает в окружающую среду (водоем). В случае выхода величины текущей оптической плотности за допустимые пороги, что может произойти при аварийном сбросе на объекте контроля (предприятии), с блока обработки и управления *4* поступают управляющие сигналы на те элементы блокировки контролируемой среды *13*, в отводах которых установлены дополнительные фильтры *14*, предназначенные для фильтрации соответствующих компонентов, содержащихся в продуктах аварийного сброса. При открытии соответствующих элементов *13* компоненты аварийного сброса фильтруются дополнительными фильтрами *14*, установленными в этих отводах, после чего очищенная вода поступает в окружающую среду (открытый водоем). Возможные остатки аварийного сброса контролируются первым оптоэлектронным датчиком *3*. В случае выхода величины текущей оптической плотности за допустимый порог с блока обработки и управления *4* подаются управляющие сигналы на закрытие задвижки *6* (первый выход блока *4*) и открытие задвижки *7* (второй выход блока *4*). В результате остатки загрязняющего вещества вместе с контролируемой средой поступают через отвод *5* в блок утилизации *10* для дальнейшей утилизации и не проходят в систему очистки (фильтр очистки *8*) и далее в окружающую среду. При восстановлении через определенный интервал времени эталонного значения текущей оптической плотности контролируемой среды (окончание аварийного сброса) задвижки возвращаются в нормальное положение (задвижка *6* открыта, задвижка *7* закрыта). Для повышения достоверности определения момента окончания поступления загрязняющих веществ от аварийного сброса в блок утилизации *10* и недопустимости их проникновения в окружающую среду используется второй оптоэлектронный датчик *9*, аналогичный первому датчику *3*, сигнал с которого пропор-

циональный оптической плотности контролируемой среды в отводе *5* после места расположения заслонки *7* поступает на второй вход блока обработки и управления *4*, который выдает управляющий сигнал на открытие заслонки *6* только в том случае, если оптическая плотность контролируемой среды после прохождения заслонки *7* восстановит свое эталонной значение.

Более сложная ситуация возникает при смешивании нескольких аварийных сбросов, когда аварийная ситуация предполагает в одно время разгерметизацию нескольких хранилищ или трубопроводов.

При смешивании различных веществ может быть две ситуации:

а) в результате химических реакций образуются новые вещества;

б) смешивание приводит к раствору этих веществ.

В любом случае требуется предварительный спектральный анализ образующихся веществ и растворов.

Предполагаемое устройство будет выполнять основную функцию – идентификацию веществ для растворов нескольких веществ, но сброс раствора будет происходить в первый отстойник по ходу канала, предназначенный для одного из веществ в растворе.

Для обеспечения работы устройства необходим комплекс предварительного исследования спектральных характеристик веществ при выбранном диапазоне воздействия лазерного излучения.

Пусть будет n веществ в списке аварийных сбросов, и пусть для каждого из веществ существует одна длина волны λ, характеризующая данное вещество:

$$\forall_{i=1}^{n} A_i \to \lambda_i,$$

где $i \in 1, n$, A – вещество.

Тогда для каждой λ_i будет создан оптоэлектронный датчик, содержащий лазер с длиной волны λ_i и фотоэлемент с частотной характеристикой, содержащей длину волны λ_i.

В случае совпадения длин волн различных веществ последние можно объединить в одну группу с одним отстойником или искать вторую длину волны для построения двухлучевого оптоэлектронного датчика.

Список литературы

1. *Горшков, М. В.* Экологический мониторинг : учеб. пособие. – Владивосток : Изд-во ТГЭУ, 2010. – 313 с.

2. *Новиков*, *Ю. В*. Экология, окружающая среда и человек : учеб. пособие. – М. : ФАИР-ПРЕСС, 2005. – 736 с.

3. *Алексеев*, *В. А*. Экспресс-контроль загрязнений сточных вод урбанизированных территорий / В. А. Алексеев, В. П. Усольцев, С. И. Юран // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем : материалы XIV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Кн. 1. (г. Киров, 5–8 дек. 2016 г.). – Киров : Радуга-ПРЕСС, 2016. – С. 14–18.

4. Пат. № 153362 РФ на полезную модель. МПК G01N 15/06. Устройство устранения аварийного выброса / Алексеев В. А., Девятов Н. А., Юран С. И., Усольцев В. П. – Заявка 2014141487 от 14.10.2014. – Опубл. 20.07.15. – Бюл. № 20.

Optoelectronic Device of the Emergency Discharges at Industrial Enterprises in the Wastewater

To detect accidental discharge sewage need to be monitored in real-time that can be implemented with the use of the optical methods for liquids studying. From the analysis of various substances spectral characteristics characteristic frequencies for each of them can be identified. The proposed emergency discharges removal device performs the function of identifying substances for several emergency discharges solutions.

Keywords: emergency discharge; pollution; sewage; optical control schemes; the opto-electronic sensor; eliminating accidental discharge

УДК 681.785; 615.47

В. А. Алексеев, доктор технических наук, профессор
А. С. Перминов, старший преподаватель
E-mail: perminovac@mail.ru
С. И. Юран, доктор технических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Математическое моделирование рассеяния света биотканью с помощью метода Монте-Карло

Представлены результаты математического моделирования распространения оптического излучения в биологической ткани с учетом многослойности данной среды и конечного размера падающего пучка с помощью метода Монте-Карло. Получено распределение рассеянных фотонов в зависимости от расстояния между источником и приемником излучения, а также диаметра источника при нормальном падении оптических лучей.

Ключевые слова: многослойная биологическая ткань; моделирование; оптоэлектронный датчик; фотоплетизмография

Важным фактором повышения качества регистрируемых пульсовых кривых методом фотоплетизмографии является совершенствование оптоэлектронных датчиков с точки зрения повышения достоверности получаемой информации, чувствительности и удобства эксплуатации [1, 2].

Объектом для фотоплетизмографии служит биологическая ткань, являющаяся очень сложным объектом, в том числе с точки зрения оптики. Для получения фотоплетизмограмм с помощью датчика, работающего на обратное рассеяние светового потока (планарные датчики), необходимо знать, как геометрические параметры строения ткани: толщина слоя, глубина залегания кровеносных сосудов, так и оптические свойства этих объектов – показатели преломления света, коэффициенты поглощения и др. [3].

Для расчета прохождения излучения через биоткань использовался метод Монте-Карло. С точки зрения решения уравнения переноса излучения, метод Монте-Карло заключается в компьютерном моделировании случайного блуждания N числа фотонов. Для получения приемлемой аппроксимации необходимо рассматривать большое количество фотонов, поскольку точность результатов пропорциональна N [4–8].

© Алексеев В. А., Перминов А. С., Юран С. И., 2017

Моделирование взаимодействия излучения с биологической тканью проводилось для двух длин волн 633 и 810 нм. Оптические свойства слоев кожи, используемые при моделировании, для длин волн $\lambda = 633$ нм и $\lambda = 810$ нм представлены в [4]. Кожная ткань представляется в виде слоистой структуры, состоящей из эпидермиса, дермы, крови и гиподермы. Слои параллельно залегают на различной глубине, каждый слой однороден по составу и свойствам.

Рассмотрим распределение рассеянных фотонов в зависимости от расстояния между источником и приемником излучения, а также диаметра источника при нормальном падении оптических лучей на основе статистического моделирования методом Монте-Карло. Моделирование осуществлялось с помощью программы *MathCAD 13*.

Предполагаем, что все фотоны попадают в биоткань, т. к. отраженный от поверхности биоткани поток не представляет интереса. Фотоны по диаметру пучка распределены равномерно. Вероятность обратного рассеяния фотонов на эритроцитах возьмем 20 % ($R_e = 0{,}2$).

Оптические параметры неоднородной среды для данных длин волн представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. **Оптические свойства слоев кожи, используемые при моделировании ($\lambda = 633$ нм)**

Слой	μ_s, мм$^{-1}$	μ_a, мм$^{-1}$	g	Толщина, мм
Роговой слой	100	0,8	0,9	0,02
Эпидермис	60	0,15	0,85	0,08
Дерма с капиллярными петлями	30	0,07	0,9	0,15
Дерма с поверхностным сплетением сосудов	35	0,1	0,95	0,08
Дерма	25	0,05	0,76	1,5
Дерма с глубоким сплетением сосудов	35	0,15	0,95	0,08

Таблица 2. **Оптические свойства слоев кожи, используемые при моделировании ($\lambda = 810$ нм)**

Слой	μ_s, мм$^{-1}$	μ_a, мм$^{-1}$	g	Толщина, мм
Эпидермис	11,5	0,205	0,8	0,1
Дерма	5	0,024	0,8	1,81
Кровь	30	0,068	0,995	

В результате моделирования вид функции распределения неинформативных фотонов от расстояния между источником излучения и фотоприемником для двух длин волн получается похожим (рис. 1).

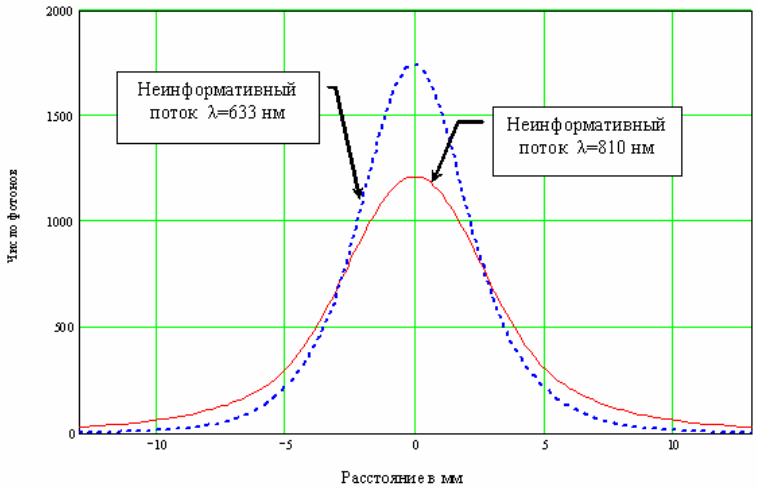


Рис. 1. Рассеянный поток для длин волн 633 и 810 нм (N = 1 000 000, dis = 3 мм, Re = 0,2)

Уровень неинформативного потока (количество фотонов) для λ = = 633 нм при одних и тех же условиях в 2 раза выше неинформативного потока для λ = 810.

Функцию распределения фотонов, взаимодействующих с эритроцитами (информативный поток), и функцию распределения фотонов, не взаимодействующих с эритроцитами (неинформативный поток), для длины волны 633 нм иллюстрирует рис. 2. Результаты расчета показали, что при условии: N = 1 000 000, d_{is} = 3 мм, R_e = 0,2 и λ = 633 нм уровень информативного потока составлял 34 % от полного рассеянного в обратном направлении потока. Информативный поток меньше неинформативного для 633 нм.

Информативный поток в случае с длиной волны 810 нм оказался больше, при этом неинформативный поток стал меньше (рис. 3). Уровень информативного потока при λ = 810 нм составлял 62 % от полного рассеянного в обратном направлении потока. Для 810 нм информативный больше неинформативного.

Изменение распределения информативного и неинформативного потоков при изменении диаметра источника представлено на графиках рис. 4 и 5 для λ = 633 нм и λ = 810 нм соответственно.

Поскольку функция симметричная, то на графиках можно ограничиться только частью функции для первой четверти декартовой систе-

мы координат. Это позволяет продемонстрировать различия в функции при смене диаметра источника излучения.

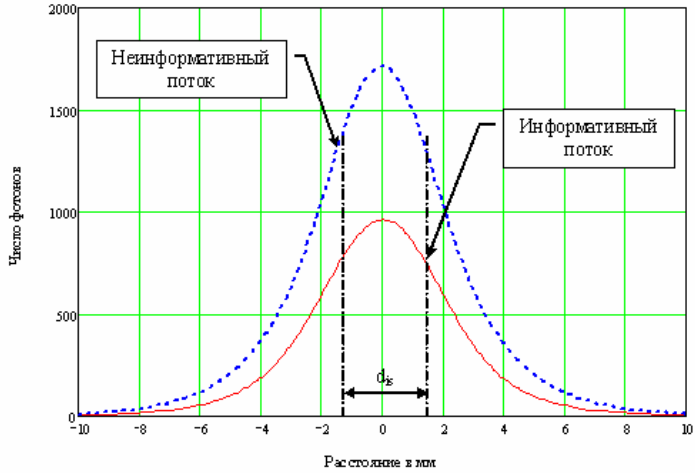


Рис. 2. Рассеянные потоки (N = 1 000 000, dis = 3 мм, Re = 0,2, λ = 633 нм)

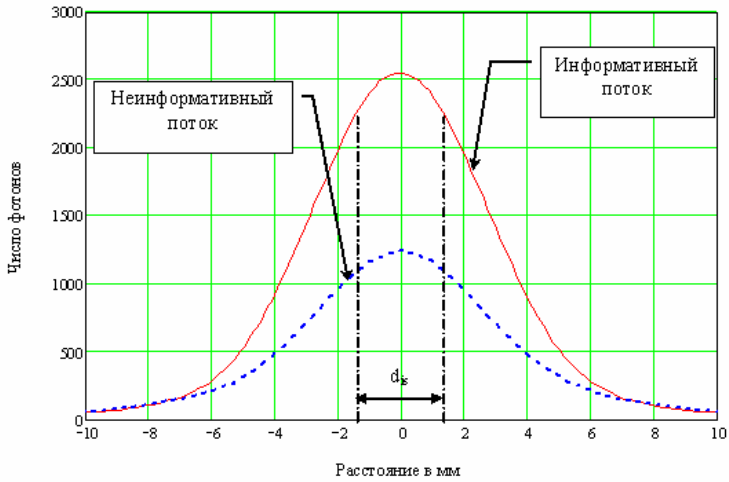


Рис. 3. Рассеянные потоки (N = 1 000 000, dis = 3 мм, Re = 0,2, λ = 810 нм)

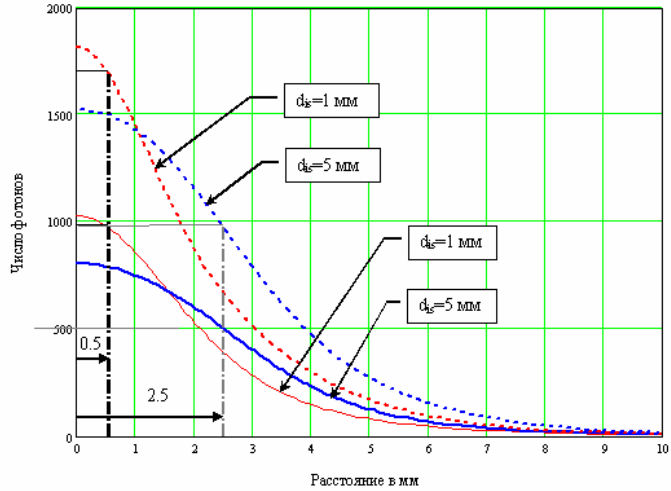


Рис. 4. Вид функций распределения фотонов для информативной (сплошная линия) и для неинформативной (прерывистая линия) составляющей рассеянного потока фотонов (N = 1 000 000, Re = 0,2, λ = 633 нм)

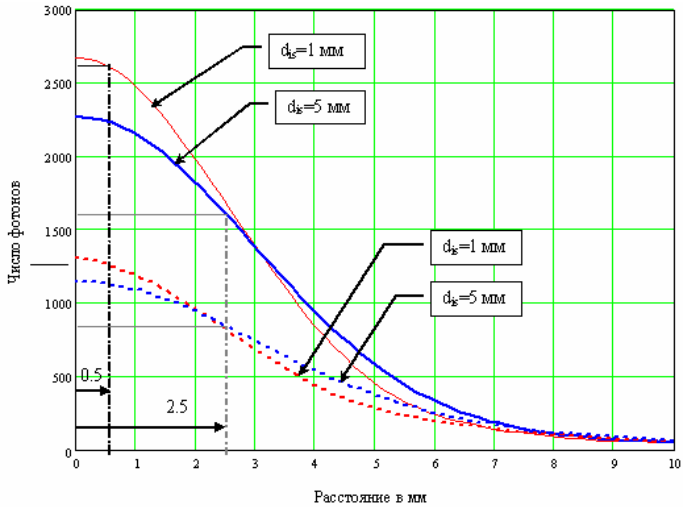


Рис. 5. Вид функций распределения для информативной (сплошная линия) и для неинформативной (прерывистая линия) составляющей рассеянного потока фотонов (N = 1 000 000, Re = 0,2, λ = 810 нм)

С точки зрения построения датчика для фотоплетизмографии изменение сигнала в центре функции говорит о том, что при большом диаметре источника значительная часть потока возвращается в область под источником излучения и не может быть зарегистрирована. Данные моделирования для $\lambda = 810$ нм показали, что при $d_{is} = 1$ мм в область под источником попадает около 24 % от информативного потока, а при $d_{is} = 5$ мм – 69 %.

Согласно полученным результатам получается, что если падение излучения нормально, то фотоприемник должен быть как можно ближе к источнику излучения. С точки зрения размеров источников, применение источника излучения с меньшим диаметром является более предпочтительным.

Исследование взаимодействия излучения с веществом с помощью метода Монте-Карло позволяет адекватно предсказать характер распространения излучения в биоткани с учетом многослойности последней и конечного размера падающего пучка, что свидетельствует о возможности применения данного метода для более сложных расчетов.

Доработка модели в направлении усложнения формы слоев и проведение дополнительных экспериментов позволит моделировать распространение рассеянного потока так, что при конструировании датчиков не понадобится проводить трудоемких экспериментов.

Список литературы

1. *Перминов*, *А. С.* Проектирование оптоэлектронных датчиков с устранением влияния артефактов / А. С. Перминов, С. И. Юран // Вестник ИжГТУ, 2010. – № 3(47). – С. 102–105.

2. *Алексеев*, *В. А.* Взаимное расположение источника и приемника излучения датчика для фотоплетизмографии / В. А. Алексеев, А. С. Перминов, С. И. Юран // Приборы и методы измерений. – 2011. – № 1(2). – С. 5–9.

3. *Тучин*, *В. В.* Исследование биотканей методами светорассеяния // Успехи физических наук. – 1997. – Т. 167. – № 5. – С. 517–539.

4. *Бердников*, *А. В.* Медицинские приборы, аппараты, системы и комплексы. – Ч. I. Технические методы и аппараты для экспресс-диагностики : учеб. пособие / А. В. Бердников, М. В. Семко, Ю. А. Широкова. – Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. – 176 с.

5. *Пушкарева*, *А. Е.* Методы математического моделирования в оптике биоткани : учебн. пособие. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2008. – 103 с.

6. *Сетейкин*, *А. Ю.* Анализ по методу Монте-Карло процессов распространения лазерного излучения в многослойных биоматериалах // Оптика и спектроскопия. – 2005. – Т. 99. – Вып. 4. – С. 685–688.

7. *Меглинский*, *И. В.* Исследование возможности увеличения глубины зондирования методом отражательной конфокальной микроскопии при иммерси-

онном просветлении приповерхностных слоев кожи человека / И. В. Меглинский, А. Н. Башкатов // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32. – № 10. – С. 875–882.

8. *Печень, Т. М.* Моделирование процесса взаимодействия электомагнитной волны оптического диапазона с кожей человека / Т. М. Печень, А. М. Прудник // Доклады БГУИР. – 2015. – № 1(87). – С. 28–33.

Mathematical Modeling of Light Scattering by a Biological Tissue Based on the Method of Monte Carlo

The results of mathematical modeling of propagation of optical radiation in biological tissues taking into account the layering of the environment and of the finite size of the incident beam using the method of Monte Carlo. The resulting distribution of scattered photons depending on the distance between the source and the detector, and the diameter of the source at normal incidence of the optical rays.

Keywords: multilayer biological tissue; modeling; optoelectronic sensor; photoplethysmography

УДК 681.785; 615.47

С. А. Ардашев, инженер
А. С. Перминов, старший преподаватель
E-mail: perminovac@mail.ru
С. И. Юран, доктор технических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Генератор тестовых сигналов для фотоплетизмографов

Разработан генератор пульсовых кривых, предназначенный для тестирования программ обработки фотоплетизмограмм и аппаратурной части фотоплетизмографа. Процедура тестирования фотоплетизмографа с помощью генератора повышает точность вычисления гемодинамических показателей и, следовательно, качество диагностики сердечнососудистой системы биологических объектов.

Ключевые слова: артефакты; калибратор сигналов пульсовой кривой; оптоэлектронный датчик; тестирование; фотоплетизмография

В процессе совершенствования узлов фотоплетизмографа [1–3], в том числе оптоэлектронного датчика – одного из важных элементов, определяющих качество получаемых пульсовых кривых, возникает необходимость исследования параметров и характеристик измерительного тракта автоматизированного фотоплетизмографа, а также его программного обеспечения.

Для проверки работоспособности и оценки качества работы фотоплетизмографов существуют калибраторы сигналов пульсовой кривой типа генератора биосигналов серии «Диатест-4» и др. [4–6]. В ряде калибраторов используются генераторы синусоидальных колебаний, работающие в низкочастотном диапазоне, генераторы, имитирующие форму пульсовой кривой, а также генераторы, позволяющие формировать сигнал с учетом влияния дыхательных волн.

Для решения задач по совершенствованию аппаратуры для фотоплетизмографии необходимо создание генератора пульсовых кривых, который бы позволил тестировать как программы обработки фото-плетизмограмм, так и аппаратурную часть фотоплетизмографа [7, 8].

Генератор выполняет функцию формирования заданного электрического сигнала, отражающего определенную форму пульсовой кри-

© Ардашев С. А., Перминов А. С., Юран С. И., 2017

вой, для подачи его на вход фотоплетизмографа для тестирования как оптоэлектронного датчика, так и измерительного тракта.

Основная часть структурной схемы генератора приведена на рис. 1.

Рис. 1. Структурная схема генератора пульсовых кривых

Устройство имеет 3 режима работы:

1. Тестирование автоматизированной системы фотоплетизмографии – работа с фотоплетизмографом. В этом режиме прибор служит имитатором оптоэлектронного датчика. Импульсы, поступающие на генератор с фотоплетизмографа, являются импульсами синхронизации для генерации сигнала. Все тестирующие сигналы идентифицируются именем (14 символов). После задания режима работы выбирается сигнал по имени, и запускается генерация, затем подключается фотоплетизмограф. В этом режиме при регулировке смещения отображается начальный ток излучателя. Он может составлять 0–16 мА (шаг – 1 мА). Это позволяет при разных уровнях сигнала находиться в линейной части ВАХ излучателя оптрона.

2. Автономный режим генерации синусоидального сигнала. Частота может изменяться в диапазоне 0–20000 Гц. Шаг перестройки 0,1 Гц. Частота дискретизации 100 кГц. В этом режиме оператором осуществляется выбор частоты.

3. Ручной режим – режим полностью ручной настройки, позволяющий выбрать сигнал по имени из памяти, а также выбрать режим синхронизации – по фронту, по спаду, а также частоту дискретизации. Частота дискретизации в режиме внутренней синхронизации ограничена аппаратными возможностями микроконтроллера. Она получена делением частоты 4 МГц на число, кратное 2, 4, 5, и устанавливается в диапазоне от 200 Гц до 100 кГц.

Пульт управления состоит из 5 клавиш: вверх (смещение+), вниз (смещение–), влево (уровень–), вправо (уровень+), выбор (старт/стоп). В режиме управления клавишами осуществляется навигация по меню прибора. В режиме генерации осуществляется регулировка уровнем и смещением сигнала (указано в скобках).

Встроенные в прибор жидкокристаллический дисплей и пульт управления позволили использовать его автономно без компьютера.

Генератор собран в компактном корпусе. Габариты прибора (57×90×25 мм^3). Вид передней панели генератора приведен на рис. 2.

Рис. 2. Вид передней панели генератора

На рис. 3–5 приведены эпюры сигналов. Слева – измеренные непосредственно с контрольных точек генератора цифровым осциллографом. Справа – сигналы, контролируемые в разработанной программе *Pulse viewer* с помощью фотоплетизматографа.

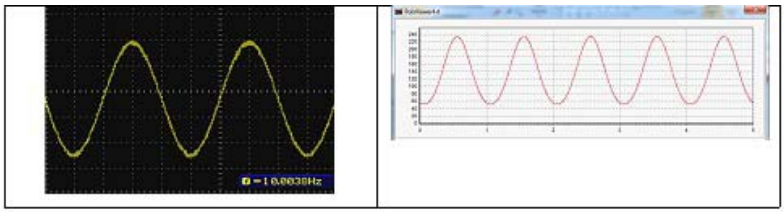


Рис. 3. Синусоидальный тестовый сигнал

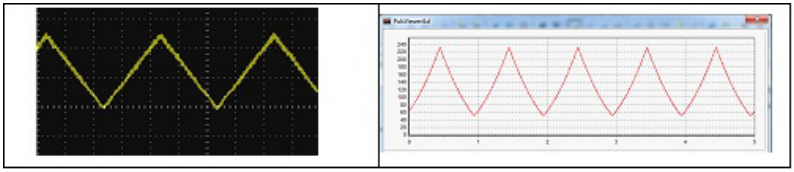


Рис. 4. Пилообразный тестовый сигнал

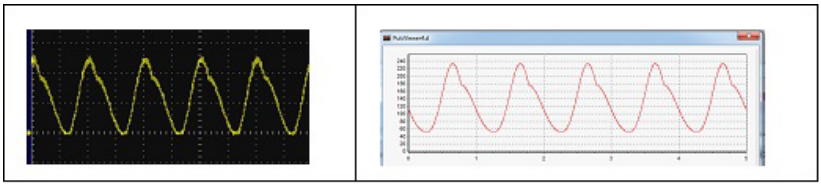


Рис. 5. Тестовый сигнал в виде фотоплетизмограммы

Разработанный генератор может использоваться для тестирования как аппаратной части фотоплетизмографа, так и его программного обеспечения, например, для оценки методов, алгоритмов и конструкций оптоэлектронных датчиков, обеспечивающих снижение влияния артефактов, обусловленных оптическими помехами, дыхательными волнами, движением биологического объекта и др. С помощью данного генератора можно создавать эталоны образцовых пульсовых кривых, а также широкий спектр эталонов артефактов различной природы и эталонов, имитирующих заболевания сердечнососудистой системы. Процедура тестирования фотоплетизмографа с помощью разработанного генератора повышает точность вычисления гемодинамических показателей, а значит, и качество диагностики сердечнососудистой системы.

Список литературы

1. *Allen*, *J.* Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement // Physiological Measurement. – 2007. – V. 28, Iss. 3. – P. 1–39.

2. *Федотов*, *А. А.* Исследование сфигмографического измерительного преобразователя пульсовой волны / А. А. Федотов, А. С. Акулова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – Т. 14, № 4. – 2015. – С. 192–199.

3. *Алексеев*, *В. А.* Автоматизированный фотоплетизмограф / В. А. Алексеев, С. А. Ардашев, С. И. Юран // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 1(6). – С. 46–51.

4. А. с. 1519645 СССР, МКИ[5] А61В 5/02. Способ калибровки фотоплетизмографа / Зайцев В. П. – Опубл. 1989. Бюл. № 41.

5. А. с. 1595465 СССР, МКИ[5] А61В 5/02. Имитатор пульсового сигнала / Наумович А. С., Золотой С. А., Дробот А. Н. и др. – Опубл. 1990. Бюл. № 36.

6. Генератор функциональный «ДИАТЕСТ-4». Руководство по эксплуатации. – М. : ЗАО «Руднев-Шиляев», 2008. – 69 с.

7. *Ардашев*, *С. А.* Имитатор пульсовой кривой для автоматизированного фотоплетизмографа / С. А. Ардашев, А. С. Перминов, С. И. Юран // Измерения в современном мире – 2013 : сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч.-практ. конф.

(Санкт-Петербург, 3–5 июня 2013 г.). – СПб. : Изд-во политехн. ун-та, 2013. – С. 163–166.

8. *Алексеев, В. А.* Использование имитатора пульсовых кривых для тестирования и калибровки фотоплетизмографа / В. А. Алексеев А. С. Перминов, С. И. Юран / Приборостроение в XXI веке – 2015. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XI Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 25–27 нояб. 2015 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. – С. 504–510 (Электронное издание).

Test Signal Generator for Photoplethysmography

Developed by the pulse generator curves, designed to test the processing of photoplethysmograms and hardware parts photoplethysmograph. The process of testing photoplethysmograph generator increases the accuracy of calculation of hemodynamic indices and, consequently, the quality of diagnostics of cardiovascular system of biological objects.

Keywords: artifacts; the calibrator of the signals of the pulse curve; the optoelectronic sensor; testing; photoplethysmography

УДК 620.179.17

И. Н. Бурнышев, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
E-mail: inburn@mail.ru
Д. Г. Калюжный, кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт механики УрО РАН, г. Ижевск
В. А. Фукалов, магистрант
Удмуртский государственный университет, г. Ижевск

Акустическая эмиссия при наводороживании циркониевого сплава Э125

Проведены исследования циркониевого сплава Э125 методом акустической эмиссии в процессе катодного наводороживания в растворе электролита. Интенсивность акустической эмиссии возрастает с увеличением плотности катодного тока. Зависимость акустической эмиссии от времени наводороживания изменяется немонотонно и определяется уровнем дискриминации сигналов акустической эмиссии.

Ключевые слова: акустическая эмиссия; водородная хрупкость; наводороживание; цирконий; водород

Введение

Циркониевые сплавы из-за малого сечения захвата нейтронов широко применяются в атомной промышленности в качестве материала для канальных и оболочковых труб [1]. В процессе эксплуатации реакторов поверхности труб взаимодействуют с водородом. Источниками водорода являются его выделение при коррозионном взаимодействии внешней стороны оболочки с теплоносителем и влага под оболочкой, адсорбированная таблетками оксида урана. Из-за малой растворимости в цирконии водород при охлаждении от рабочей температуры реактора выделяется в виде гидридов, что приводит к замедленному гидридному растрескиванию циркониевых сплавов. Процесс деградации наводороженных циркониевых сплавов обычно состоит из трех стадий: образование трещин в гидриде, выход трещины из гидрида в металл и ее распространение в металле [1].

В реакторной технологии перспективным методом обнаружения коррозионного растрескивания и контроля сварных соединений считается акустическая эмиссия (АЭ) [2]. Согласно ГОСТу 27655–88 «Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения» под акусти-

© Бурнышев И. Н., Калюжный Д. Г., Фукалов В. А., 2017

ческой эмиссии понимают излучение материалом механических волн, вызванное динамической локальной перестройкой структуры материала. Ранее этот метод нами был использован для мониторинга катодного наводороживания сплава Э125 при малых плотностях катодного тока [3]. Эти исследования показали, что при таких плотностях тока варьированием уровнями дискриминации трудно выделить одиночные импульсы большой мощности, характеризующие процессы образования гидридов и возникновение трещин в гидридах или в металле.

Целью данной работы является исследование кинетических особенностей поведения АЭ при наводороживании сплава Э125 при больших плотностях катодного тока дискриминации сигналов.

Методика проведения экспериментов

Объектом исследования служили образцы циркониевого сплава Э125, вырезанные из листа толщиной 2 мм. Образцы перед началом эксперимента для удаления оксидной пленки подвергались травлению в водном растворе 5 % плавиковой кислоты в течение 30 секунд при комнатной температуре. Для исследования образцы изготавливались в виде пластин размерами 150×10×2 мм.

Катодное наводороживание образцов производилось при комнатной температуре в электролите, содержащем однонормальный раствор серной кислоты, плотность катодного тока составляла 200 и 400 мА/см^2. В качестве стимулятора наводороживания использовали тиомочевину $CS(NH_2)_2$ из расчета 1,5 г на 1 литр раствора. Регистрация сигналов акустической эмиссии осуществлялось прибором АФ-15. Датчиком служил широкополостной пьезоэлектрический преобразователь ПЭП113 с рабочим диапазоном частот от 200 до 1000 кГц. За информативный параметр акустической эмиссии выбран суммарный счет импульсов АЭ за 10 с наводороживания (скорость счета за временной интервал, равный 10 с). Для наводороживания использовалась электролитическая ячейка, схема которой приведена в работе [3]. Общая площадь наводороживаемой поверхности составляла 5 см^2. Наводороживание образцов производилось циклически, продолжительность одного цикла равнялась 8 часам. Общая продолжительность наводороживания составила 42 ч для плотности катодного тока 200 мА/см^2 и 22 ч для плотности тока 400 мА/см^2.

Обсуждение полученных результатов

Зависимости числа импульсов акустической эмиссии за 10-секундный интервал наводороживания от длительности наводороживания при плотностях тока 200 и 400 мА/см^2 представлены на рис. 1 и 2. (Для получения истинного значения импульсов АЭ данные на ординате

графиков необходимо умножить на множитель у показателя уровня дискриминации, указанного на вставках графиков).

В течение первого цикла наводороживания при плотности тока 200 мА/см^2 число импульсов малой мощности относительно невелико (уровни дискриминации 16–24 dB). Во втором цикле активность АЭ резко возрастает и продолжает расти в течение третьего цикла наводороживания. Во время четвертого цикла активность АЭ растет уже с меньшей скоростью по сравнению с предыдущим циклом. Последний (пятый) цикл наводороживания характеризуется дальнейшим снижением активности АЭ.

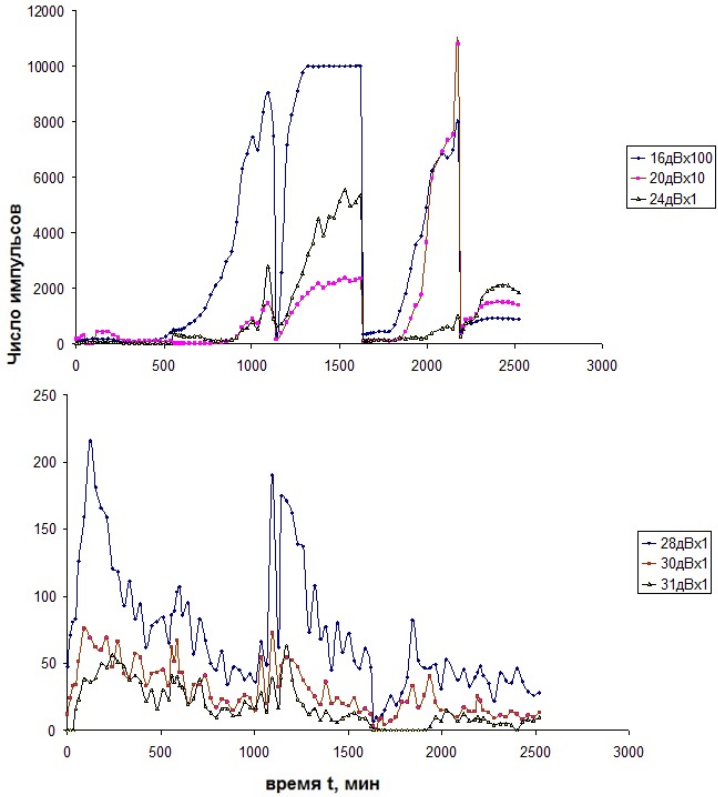


Рис. 1. Поведение АЭ при наводороживании циркониевого сплава Э125 (плотность тока 200 мА/см^2)

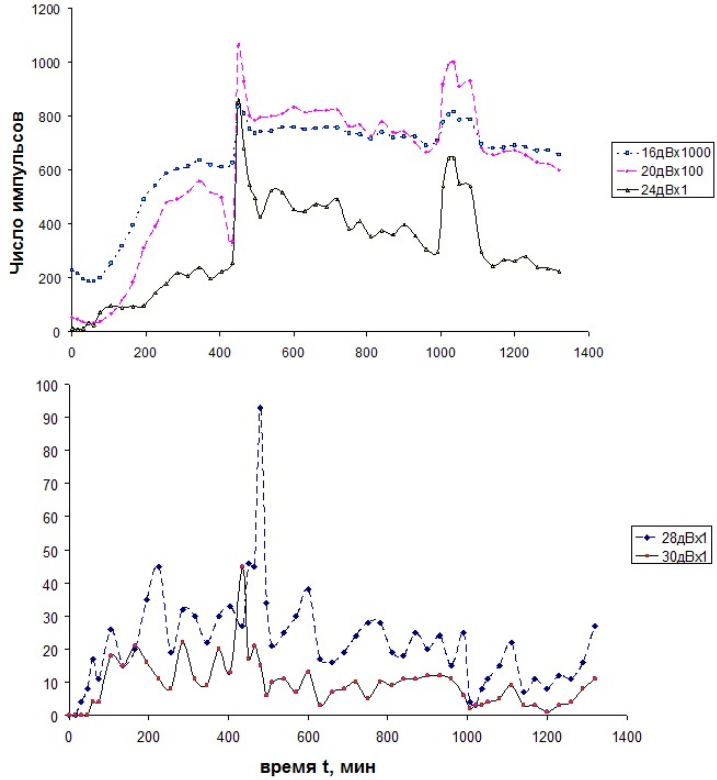


Рис. 2. Поведение АЭ при наводороживании циркониевого сплава Э125 (плотность тока 400 мА/см^2)

Поведение АЭ при больших уровнях дискриминации кардинально отличается от поведения в рассмотренном выше случае. Основное отличие состоит в том, что в начале каждого цикла активность АЭ выше, чем в конце цикла, т. е. по мере наводороживания происходит снижение мощности акустических сигналов. Вторым отличием является неравномерный по времени наводороживания характер активности АЭ.

При плотности тока 400 мА/см^2 наблюдается более интенсивный рост скорости счета импульсов АЭ, при этом рост активности АЭ наблюдается уже во время первого цикла наводороживания (рис. 2). Последующее наводороживание во втором цикле практически не приводило к изменению АЭ. К концу третьего цикла заметна тенденция

к снижению акустической активности при уровнях дискриминации 20 и 24 dB и повышению при 28 и 30 dB. Интересно, что при больших уровнях дискриминации активность АЭ образцов, наводороженных с плотностью тока 400 мА/см^2, оказалась ниже, чем наводороженных с плотностью тока 200 мА/см^2. Кинетические кривые активности АЭ, полученные при плотности катодного тока 400 мА/см^2, имеют более дискретный вид, чем при плотности тока 200 мА/см^2.

Изменения активности АЭ в процессе наводороживания могут быть обусловлены несколькими причинами, такими как образование пузырьков водорода (кислорода) на поверхности катода (анода), их рекомбинация и схлопывание; схлопывание пузырьков газов на поверхности электролита; образование гидридов в сплаве, в том числе гидридной пленки на поверхности сплава; образование трещин в гидриде и выход их в металл. Образование пузырьков газа на поверхности электродов и их схлопывание на поверхности электролита наблюдалось визуально; образование гидридной пленки на поверхности сплава подтверждено результатами рентгеноструктурного и металлографического анализов. В дальнейшем необходимо выяснить вклад каждого источника в общую картину АЭ.

Выводы

В результате проведенных исследований экспериментально установлено, что интенсивность акустической эмиссии возрастает с увеличением плотности катодного тока. Зависимость АЭ от времени наводороживания изменяется немонотонно и определяется уровнем дискриминации сигналов акустической эмиссии.

Список литературы

1. *Займовский*, *А. С.* Циркониевые сплавы в атомной энергетике / А. С. Займовский, А. В. Никулина, Н. Г. Решетников. – М. : Энергоиздат, 1981. – 232 с.

2. *Баранов*, *В. М.* Акустические измерения в атомной энергетике. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

3. *Бурнышев*, *И. Н.* Акустические шумы при наводороживания металлов / И. Н. Бурнышев, Д. Г. Калюжный // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов IX Всерос. науч.-техн. конф. (Ижевск, 13–14 нояб. 2013 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2014. – С. 345–349.

Features of Identification of Biological Materials

Investigations of zirconium alloy Э125 by acoustic emission in the process of hydrogenation of the cathode in the electrolyte solution. Acoustic emission intensity increases with increasing cathodic current density. The dependence of the acoustic emission from the hydrogenation time varies monotonically and is determined by the level of discrimination of acoustic emission signals.

Keywords: acoustic emission; hydrogen embrittlement; hydrogen absorption; zirconium; hydrogen

УДК 62.1.9

Р. Г. Дойников, студент
О. В. Пешкова, студентка
А. И. Калугин, кандидат физико-математических наук, доцент
E-mail: ruslan9_97@mail.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Лазерная установка для измерения изменения температуры поверхности металла

Представлен обзор метода лазерной термометрии поверхности по отражению света. Разработана структурная схема лазерной установки для термометрии поверхности металла, произведен расчет оптической схемы установки.

Ключевые слова: лазерная установка; контроль температуры; поверхность металла; термоотражение

Введение

Контроль температуры является одним из важных и неотъемлемых параметров практически любого технологического процесса. В настоящее время без точного контроля изменения температуры невозможно существование и развитие металлургии, биотехнологии, электроники, энергетики, и других отраслей современной индустрии. От точности и надежности температурных измерений зависят безопасность и эффективность технологических процессов, срок службы технологического оборудования и качество изготавливаемой продукции.

Термометрия поверхности по отражению света

Термометрия – это один из разделов прикладной физики и метрологии, посвященный разработке методов и средств измерения температуры. Лазерная термометрия основана на дистанционном измерении температурно-зависимых параметров твердых тел с помощью зондирующего светового пучка и определении искомой температуры по известной температурной зависимости измеренного параметра [1].

В данной статье рассмотрен один из методов термометрии – термометрия по отраженному от нагреваемой поверхности свету. Данный метод является наименее чувствительным, но при этом наиболее часто применяемым.

© Дойников Р. Г., Пешкова О. В., Калугин А. И., 2017

Этот метод удобен для определения быстрых температурных изменений и визуализации распределения относительной температуры по площади, т. к. в его основе лежит регистрация изменений коэффициента отражения, а не точные его измерения, которые являются более сложными. Небольшие изменения температуры поверхности можно определить, измеряя относительно изменение зеркального отражения из соотношения:

$$\Delta T = \frac{\Delta R}{\beta_R R_0^2}, \qquad (1)$$

где R_0^2 – коэффициент отражения при температуре T_0; $\Delta T = T - T_0$, $\Delta R = R - R_0$, $\beta_R = \frac{\partial R}{\partial T} \cdot T_0$ – коэффициенты термоотражения.

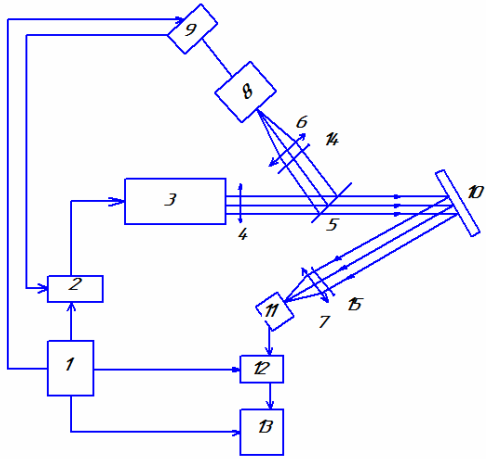
Метод термоотражения используют для изучения температурных полей в электронных микросхемах. Измеряя температуру поверхности кристалла или проводящей дорожки, можно анализировать состояние интегральной схемы во время работы. Созданы автоматизированные установки для температурной диагностики микросхем методом термоотражения [2].

Метод термоотражения обеспечивает микронное пространственное и наносекундное временное разрешение. Время, в течение которого образец прогревается на глубину, превышающую глубину формирования отраженной волны, определяет инерционность измерений. В поглощающей среде отраженная волна формируется в слое толщиной, сравнимой с α^{-1}, где α – коэффициент поглощения света. Для кремния при комнатной температуре на длине волны 0,633 мкм $\alpha \approx 4 \times 10^{-3}$ см$^{-1}$. Отсюда время прогревания, т. е. мера инерционности измерения, $\tau \sim 10$ нс. С уменьшением длины волны растет коэффициент поглощения и падает время прогревания слоя толщиной α^{-1}. Для металлов глубина проникновения и инерционность существенно меньше.

Локальность измерения определяется диаметром лазерного пучка на поверхности и для обычных условий эксперимента составляет 0,3÷1 мм [3].

Структурная схема лазерной установки

В качестве источника лазерного излучения используется полупроводниковый лазерный диод 3 (рисунок), управление которого будет осуществляться с помощью драйвера лазерного диода.



Структурная схема установки: *1* – блок питания; *2* – драйвер лазерного диода; *3* – источник лазерного излучения (лазерный диод); *4* – объектив источника излучения; *5* – светоделительная пластина; *6*, *7* – объективы фотоприемных устройств; *8*, *11* – фотоприемные устройства; *9* – система обработки сигнала и контроля выходной мощности лазерного диода; *10* – объект исследования; *12* – усилитель сигнала; *13* – система обработки сигнала; *14*, *15* – светофильтры

Скачки напряжения, различные виды шумов электрических схем воспринимаются как изменение температуры, поэтому для контроля излучения лазерный пучок будет делиться на две ветви: контрольную и измерительную. Контрольная ветвь с помощью светоделительной пластины *5* направляется на отдельное фотоприемное устройство *8*, а далее – на систему обработки сигнала и контроля мощности лазерного диода *9*.

Измерительная ветвь излучения направляется на исследуемый объект *10*, отражаясь от него, попадает на фотоприемное устройство *11*, где полученный сигнал проходит обработку на системе обработки сигнала *13*.

Выводы

В работе была разработана структурная схема лазерной установки для термометрии поверхности металла, выполнен расчет оптической схемы данной установки, а также разработан лабораторный макет установки.

На базе данной установки в дальнейшем возможно изготовление прибора, позволяющего дистанционно измерять изменение температуры поверхности с достаточно высокой точностью.

Список литературы

1. *Магунов, А. Н.* Лазерная термометрия твердых тел. – М. : ФизматЛит, 2001. – 224 с.

2. Проектирование оптико-электронных приборов : учеб. / Ю. Г. Якушенков [и др.]. – М. : Логос, 2000. – 488 с.

3. *Латыев, С. М.* Конструирование точных оптических приборов : учеб. пособие. – СПб. : Политехника, 2007. – 579 с.

Laser System for Measuring the Change in the Surface Temperature of the Metal

The article provides an overview at laser thermometry methods of surface by light reflection. A block schematic diagram of laser setup for metal surface thermometry on as developed. A calculation of optical train of installation was made.

Keywords: laser setup; temperature control; metal surface; thermoreflection

УДК 53.084.827

А. А. Ежов, студент
А. И. Калугин, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика и оптотехника»
E-mail: aa_ezhov94@mail.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Разработка фотометрического прибора для измерения содержания тропонина в крови

Предметом исследований данной работы является оптическая часть иммунохроматографического анализатора. Проведение работы связано с необходимостью разработки оптической части прибора для обнаружения у человека на ранних стадиях развития инфаркта миокарда. Данный прибор сможет не только качественно, но и количественно определять содержание тропонина в крови человека. Целью работы является разработка оптической части фотометрического прибора, предназначенного для измерения содержания тропонина в крови.

Ключевые слова: иммунохроматографический анализатор; тропонин; инфаркт миокарда; оптическая часть; фотометрический анализ

Введение

Главной целью работы является разработка оптической части фотометрического прибора для обнаружения у человека на ранних стадиях развития инфаркта миокарда. Существует различные способы фиксации результатов фотометрического анализа.

Принцип фотометрического анализа заключается в сравнении количественного и качественного изменения светового потока (светопоглощения, светорассеивания, светопреломления, вращения плоскости поляризованного света и др.), прошедшего через исследуемый раствор и стандартный раствор с заранее известной концентрацией искомого вещества. Фотометрические методы [1] получили также название методов адсорбционной спектроскопии, т. к. проходящее через раствор электромагнитное излучение видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной области спектра поглощается веществом пропорционально его концентрации в растворе.

Все фотометрические методы анализа основаны на законе Ламберта – Бугера – Бера [2]. Сущность этого закона состоит в том, что при

© Ежов А. А., Калугин А. И., 2017

прохождении светового потока определенной интенсивности через кювету с исследуемым раствором часть его отражается, часть адсорбируется (поглощается) раствором, в результате чего интенсивность светового потока, прошедшего через раствор, снижается.

Среди методов адсорбционной спектроскопии наиболее широкое распространение получили фотоэлектроколориметрический и спектрофотометрические методы, значительно отличающиеся сложностью используемой аппаратуры. При колориметрическом анализе не требуется дорогостоящего оборудования, так как он основан на визуальном сравнении интенсивности окраски исследуемого и стандартного растворов. Для фотоэлектроколориметрического анализа применяют относительно несложное оптическое оборудование, позволяющее с помощью набора светофильтров использовать ту или иную широкополосную область видимого спектра света.

Спектрофотометрический метод основан на измерении светопоглощения растворов в узком пучке монохроматического света, что достигается благодаря использованию сложного оборудования, имеющего в своем составе дифракционную решетку.

При фотометрических анализах колориметрическим методом определяемое вещество переводят с помощью различных химических реакций в растворимое соединение, поглощающее электромагнитное (световое) излучение, и определяют его оптическую плотность. Поскольку светоадсорбционные свойства растворов зависят не только от концентрации в нем определяемого вещества, но и от его формы (состояния), важно выбрать такие условия протекания химических реакций, при которых искомое вещество создавало бы максимальную оптическую плотность растворов.

Разработка структурной схемы иммунохроматографического анализатора

Почти каждый медицинский иммунохроматографический анализатор [3] включает в себя: оптико-механический блок, блок обработки информации, блок питания, блок управления, принтер и дисплей – размещенных в одном корпусе.

Предполагаемая структурная схема иммунохроматографического анализатора представлена на рис. 1.

В нашем случае прибор будет состоять из следующих частей: блок питания анализатора *1*, блок управления *2*, лазерный диод *3*, оптическая система *4*, тест-система *5*, механическая система *6*, фотоприемное устройство *7*, блок обработки информации *8*, принтер *9* и дисплей *10*.

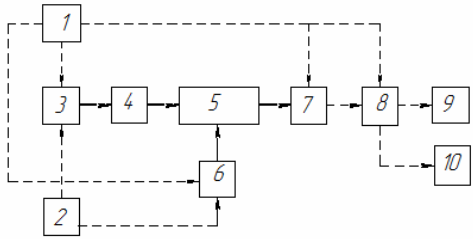


Рис. 1. Структурная схема иммунохроматографического анализатора

Лазерный диод *3* излучает световой импульс при подаче на него импульса напряжения с блока питания *1* по команде с блока управления *2*. Световой импульс подается на тест-систему *5* через оптическую систему *4*. Излучение диода, попадая на тест-систему *5* диффузно отражаясь от нее, попадает на фотоприемное устройство *7*. Тест-система *5* располагается на специальной подставке, которая двигается по горизонтальной плоскости при помощи специальной механической системы *6*. Далее от фотоприемного устройства *7* сигнал попадает на блок обработки информации *8*, где он обрабатывается и далее формируется результат в печатном виде. Информация о полученном результате попадает на дисплей *10*.

Заключение

По результатам проведенной работы была произведена:

– разработка оптической системы иммунохроматографического анализатора для измерения содержания тропонина в крови;

– предложена оптическая система для иммунохроматографического анализа крови;

– разработаны чертежи деталей оптической системы иммунохроматографического анализатора, подставки для сканирования тест-системы иммуноанализа и корпуса оптического блока

По результатам проведенной работы получаем прибор, который сможет не только качественно, но и количественно определять содержание тропонина в крови человека. По результатам работы можно судить о дальнейшей перспективной деятельности прибора как в научных, так и в медицинских целях.

Список литературы

1. *Марахова*, *А. И*. Фотометрические методы анализа / А. И. Марахова, Л. М. Якубович, Н. Н. Федоровский : учеб. пособие. – М. : ФЛИНТА: Наука, 2012. – 72 с.

2. *Иродов*, *И. Е*. Квантовая физика. Основные законы. – М. : 2002. – 338 с.
3. *Конюхов*, *В. Ю*. Хроматография : учеб. – СПб. : Лань, 2012. – 224 с.

Device for Photometric Measurement of Troponin in Human Blood

The subject of the research of this paper is part of an optical immunoassay analyzer. Carrying out the work it is related to the need to develop the optical part of the device for the detection of a person in the early stages of myocardial infarction. This device will not only qualitatively but also quantitatively determine the content of troponin in the blood. The aim is to develop the optical part of the photometric instrument designed for the measurement of troponin in the blood.

Keywords: immunoassay analyzer troponin; myocardial infarction; optical part; photometric analysis

УДК 681.586

М. С. Знаменский, студент
А. И. Калугин, кандидат физико-математических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Лазерная система оперативного картографирования на базе беспилотного летательного аппарата

Рассматриваются лазерные сканеры для БПЛА мультикоптерного типа. Описывается принцип работы лазерного сканера, приводится функциональная схема. Предлагается вариант установки лазерного сканера на БПЛА самолетного типа. Приводятся характеристики БПЛА различных типов.

Ключевые слова: лазерное сканирование; лазерный сканер; БПЛА; функциональная блок-схема

В настоящее время наиболее популярным становится применение беспилотных летательных аппаратов (далее БПЛА) для диагностики состояния линий электропередач (далее ЛЭП).

Наиболее детальной информацией о состоянии ЛЭП является ее построение 3D-модели после обработки данных полученных при помощи БПЛА.

На сегодняшний день существуют несколько методов получения 3D-модели ЛЭП при помощи БПЛА:

1. Фотограмметрическая обработка аэрофотоснимков [1] включает в себя обработку геопривязанных фотоснимков полученных с БПЛА с последующим преобразованием в ортогональную проекцию с устранением искажений аэрофотоснимка (получение ортофотоплана). Данный метод является трудоемким, требуется ручная обработка полученных данных. Для реализации данного метода требуется привлечение высококвалифицированного специалиста.

2. Облет ближайшей от оператора опоры ЛЭП при помощи БПЛА мультикоптерного типа (рис. 1) с зависанием у точек подвеса гирлянд изоляторов и грозотроса [2]. Используя БПЛА мультикоптерного типа, можно провести верховой осмотр ближайшей опоры без привлечения подъемника и отключений ЛЭП. Управление БПЛА осуществляется в ручном режиме, в непосредственной близости от элементов ЛЭП. Работа с такой короткой дистанции позволяет не только получить фотографии высокого разрешения, но и эффективно использовать теплови-

© Знаменский М. С., Калугин А. И., 2017

зор, с помощью которого можно обнаружить зоны повышенного нагрева. Для работы БПЛА в непосредственной близости от элементов ЛЭП требуется высокая квалификация операторов.

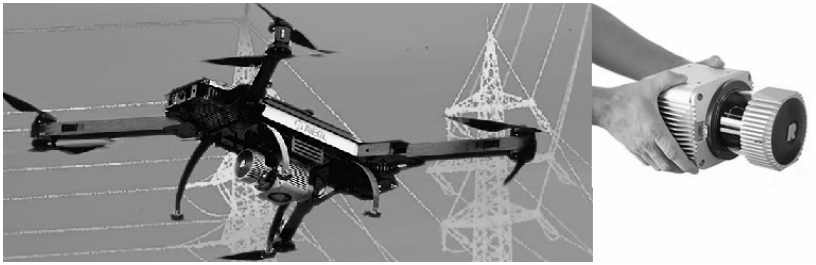


Рис. 1. БПЛА мультикоптерного типа *Riegl RiCOPTER* и лазерный сканер *Riegl VUX-1* применяемый для сканирования ЛЭП

3. Применение лазерных 3D-сканеров позволяет получать после обработки информации трехмерную модель ЛЭП. Первым результатом сканирования является облако точек, которое несет в себе информации об исследуемом объекте. По облаку точек в дальнейшем, возможно, решать различные задачи [3]:

– выявление дефектов конструкций посредством сравнения с проектной моделью;

– получение цифровых топографических планов методом одновременной аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования;

– обследование ЛЭП и других объектов сетевого хозяйства. Создание 3-мерных моделей ЛЭП и других объектов в полосе отчуждения. Оценка состояния растительности, определение мест возможных замыканий. Создание фотокарт полосы отчуждения;

– определение предельно допустимых токовых нагрузок ЛЭП.

На сегодняшний день разработаны лазерные 3D-сканеры, которые можно установить на БПЛА мультикоптерного типа: *Velodyne PUCK VLP 16* [4] и *Riegl VUX-1* [5] (рис. 1).

Технические характеристики Riegl VUX-1 приведены в табл. 1 [5].

Главный недостаток любого БПЛА мультикоптерного типа – невысокая продолжительность полета (около часа при нормальных погодных условиях) и, как следствие, ограниченный радиус применения. В табл. 2 приведены значения по продолжительности полета БПЛА мультикоптерного типа, изготавливаемых отечественными производителями.

Для сравнения приведем характеристики БПЛА самолетного типа, изготавливаемых отечественными производителями (табл. 3).

Таблица 1. **Технические характеристики Riegl VUX-1**

Диапазон измерения	До 110 м
Частота следования импульсов	550 кГц
Точность	+/– 2,5 см (на расстоянии 150 м)
Сканирующий механизм	Вращающееся зеркало
Поле зрения	300°
Угловое разрешение	0,001°
Количество точек	До 0,5 миллионов точек/сек.
Класс опасности	1
Длина волны	905 нм
Рабочая температура	0 до + 40 °С
Размеры	227×180×125 мм^3
Вес	3,5 кг
Продолжительность полета	30–40 мин

Таблица 2. **Характеристики БПЛА мультикоптерного типа**

Модель	Масса, кг	Масса ПН, кг	Время полета, мин	Дальность, км	Производитель
Supercam-X8	8,0	2	40	10	Финко
Zala421-22	8,0	2	35	5	ЦСТ
Геоскан-401	9,5	2	60	15	Геоскан

Таблица 3. **Характеристики БПЛА самолетного типа**

Модель	Масса, кг	Масса ПН, кг	Скорость, км/ч	Время полета, ч	Дальность, км	Производитель
Supercam-S350	10,5	1,5	65–120	4,0	70	Финко
Zala 421-16E	10,5	1,5	65–10	4,0	70	ЦСТ
Геоскан-201	8	1,5	64–130	3,0	75	Геоскан

Очевидным преимуществом БПЛА самолетного типа перед БПЛА мультикоптерного типа является его продолжительность и дальность полета.

Таким образом, разработка лазерного сканера на базе БПЛА самолетного типа на сегодняшний день является актуальной задачей.

Работу лазерного сканера в общем случае можно представить в виде функциональной блок-схемы (рис. 2).

При подлете к месту работ *система управления* запускает в работу лазерный сканер.

Блок питания работает от бортовой сети, обеспечивает питанием все блоки и компоненты лазерного сканера.

Система наведения представляет собой гиростабилизированную платформу, на которой закреплен излучатель и приемник. Система

должна удерживать лазерный сканер неподвижно независимо от наклонов и вибраций БПЛА. Для этого она непрерывно получает *полетные данные БПЛА*.

Синхронизатор служит для последовательного запуска импульсов излучателя.

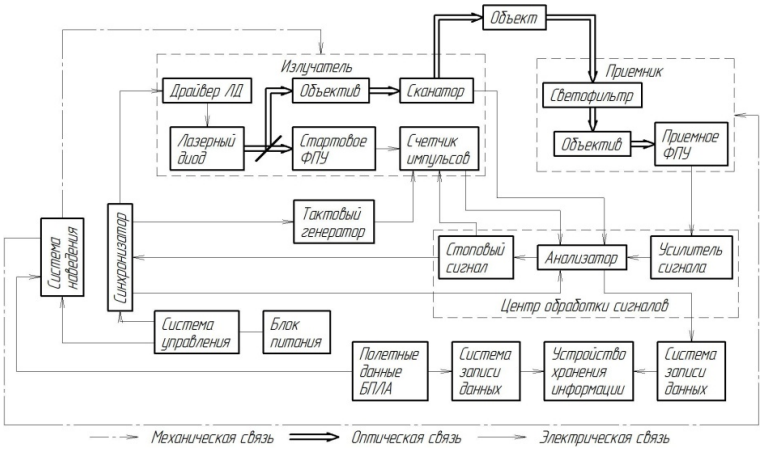


Рис. 2. Функциональная блок-схема лазерного сканера

Система «излучатель – приемник»:

В излучатель входят *драйвер лазерного диода*, управляющий длительностью и мощностью лазерного импульса диода; *лазерный диод*, испускающий сигнал; *объектив*, формирующий необходимые параметры (радиус, расходимость) пятна; сканатор, направляющий пучок в заданное место на поверхности земли; стартовое фотоприемное устройство (*стартовое ФПУ*), запускающее *счетчик импульсов* тактового генератора для измерения временных отрезков.

Сканатор излучателя представляет собой пьезоэлектрическое зеркало, которое отклоняет лазерное излучение на строго определенные углы. Отразившееся от объекта излучение попадает в приемник.

Приемник состоит из *объектива* со *светофильтром*, выделяющим требуемую длину волны и фотоприемного устройства (*приемное ФПУ*), сигнал с которого поступает на *усилитель* центра обработки сигналов.

Центр обработки сигналов получает, анализирует и сохраняет сигнал от излучателя. Сигнал от приемного ФПУ поступает на усилитель и подается в анализатор. Анализатор также получает число импульсов

тактового генератора, прошедших от момента испускания пучка лазерным диодом и от счетчика импульсов. *Анализатор* передает полученную информацию (число импульсов, величину пришедшего сигнала, данные сканатора) в систему записи данных. Как только время (число импульсов) станет больше времени прохода лазерного импульса до поверхности земли и обратно, анализатор прекращает подачу данных в систему записи и посылает *стоповый сигнал* счетчику импульсов излучателя для его остановки и обнуления и синхронизатору для сообщения о возможности следующего запуска излучателя.

Система записи данных сохраняет все полученные данные в *устройство хранения информации*.

Таким образом применение лазерного сканера на БПЛА самолетного типа для сканирования ЛЭП значительно сократит сроки и затраты на выполнение полевых работ, сохранив при этом качество и детальность съемки.

Список литературы

1. *Ессин, А. С.* Разработка методики пространственной фотограмметрической обработки материалов цифровой аэрофотосъемки, полученной с беспилотного летательного аппарата // ГЕО-Сибирь 2007 : сб. материалов науч. конгр. – Т. 3. – Новосибирск : СГГА, 2007. – С. 1.

2. Динамические особенности мониторинга воздушных линий электропередачи с помощью квадрокоптера // Современные проблемы науки и образования. – URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12773 (дата обращения: 20.10.2016).

3. Воздушное лазерное сканирование (ВЛС) в инженерных изысканиях // ООО НПФ «ТАЛКА-ГЕО». – URL: http://www.talka-geo.ru/index-9.html (дата обращения: 25.10.2016).

4. PUCK VLP 16 // Velodyne LiDAR. – URL: http://www.velodynelidar.com/vlp-16.html (дата обращения: 27.10.2016).

5. RiCOPTER with VUX-SYS // RIEGL Laser Measurement Systems. – URL: http://www.riegl.com/products/unmanned-scanning/ricopter-with-vux-sys/ (дата обращения: 27.10.2016).

The Laser System Operative Mapping on the Basis of an Unmanned Aerial Vehicle

We consider laser scanners for UAV multicopter type. It describes the operation of the laser scanner is a functional block diagram. Consider the option to install the laser scanner on the UAV aircraft type. It shows the characteristics of various types of UAVs.

Keywords: laser scanning; laser scanner; UAV; functional block diagram

УДК 681.2.08

Д. Г. Калюжный, кандидат технических наук, старший научный сотрудник
E-mail: dikdik@mail.ru
В. А. Александров, кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
E-mail: ava@udman.ru
Институт механики УрО РАН, г. Ижевск
Н. А. Рубцова, студент
E-mail: nina.rubtsova.95@mail.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Модификация поверхности Ag-Pd резистивной толстой пленки

Произведена химическая модификация поверхности серебро-палладиевого толстопленочного резистивного элемента посредством обработки водородом материала образца. Получены зависимости возникающего на элементе напряжения при воздействии на его поверхность лазерным излучением длиной волны 10,6 мкм. Показано, что регистрируемый сигнал существенно снижается после обработки водородом резистивного элемента.

Ключевые слова: резистивные пленки; модификация поверхности; лазерное излучение; серебро; палладий; полупроводник

В настоящее время как материал для изготовления элементов по толстопленочной технологии могут использоваться резистивные, диэлектрические или проводящие пасты. Они представляют собой тонкодисперсные порошки металлов или их оксидов, стекла и органического связующего. Свойства основного наполнителя (металла и его производных) определяют свойства получаемой в дальнейшем пленки – резистивные, проводящие или диэлектрические [1]. Однако поверхность уже готовой пленки можно модифицировать химическим, тепловым или иным воздействием. Внешнее воздействие на пленку способно радикально поменять свойства исходного материала вплодь до перехода резистивной пленки в проводящую.

Толстопленочные серебро-палладиевые (Ag-Pd) структуры используются в качестве резистивных элементов [2]. Основные исходные наполнители порошков, оксид серебра Ag_2O и палладий Pd обладают низкой химической активностью при высоких температурах обработки, в том числе и в оксидирующей среде, и в присутствии химически

© Калюжный Д. Г., Александров В. А., Рубцова Н. А., 2017

активного стекла, входящего в состав исходной пасты. Кроме того, они проявляют устойчивость к воздействию припоя, использующегося в дальнейшем при пайке готовых изделий на основе паст [3].

Несмотря на химическую стойкость исходных материалов в процессе термической обработки резистивной пасты образуется не только сплав серебра с палладием. В составе готового пленочного резистора обнаруживается присутствие и оксида палладия PdO [4].

Присутствие оксида PdO на поверхности Ag-Pd резисторов было подтверждено восстановлением металлического палладия на поверхности пленки в среде водорода [5]. При этом сопротивление пленки снижается. Изначально обладающая полупроводниковыми свойствами поверхность пленки приобретает металлическую проводимость.

Результаты воздействия лазерного излучения на поверхность Ag-Pd пленок были рассмотрены в некоторых ранее опубликованных нами работах. Однако сравнительных характеристик воздействия лазерного излучения на исходную и обработанную водородом пленки представлено не было.

Для экспериментов были использованы образцы пленок размером 6×6 мм. Сопротивление исходной пленки при измерении между электродами на притивоположных сторонах квадрата, составляло 60 Ом. При измерении между одним из боковых электродов и игольчатым зондом, установленным в центре квадрата пленки, сопротивление составило 134 Ом (рис. 1). После обработки пленки в течение 2 минут атомарным водородом сопротивление между зондовым и боковым электродами снизилось до 3 Ом. Воздействие атомарным водородом осуществлялось в процессе катодного электролитического процесса. Анологичного результата, т. е. снижения сопротивления пленки, достигали и воздействием на материал молекулярным водородом, но при несколько большем времени воздействия (до 15 мин.) с одновременным нагревом пленки до 65–120 °С.

После этого оба образца, исходный и обработанный водородом, были подвергнуты локальному нагреву импульсным лазерным излучением. Электрический сигнал, возникающий под воздействием лазера, регистрировался между боковым и зондовым электродами. В качестве источника излучения использовался CO_2-лазер с длиной волны 10,6 мкм. Графики зависимости величины снимаемого напряжения от координаты места падения лазерного луча представлены на рис. 2.

Вид зависимости после обработки водородом образца изменился незначительно. Однако величина снимаемого напряжения существенно уменьшилась с 0,1 мВ до 7 мкВ (по максимальным значениям). Появление напряжения на электродах обусловлено возникновением тер-

мо-ЭДС в материале резистивной пленки в результате местного нагрева. Причем вблизи электродов и примерно посередине между ними величина сигнала близка к нулю. Зависимости для образцов, обработанных атомарным и молекулярным водородом, практически не отличаются.

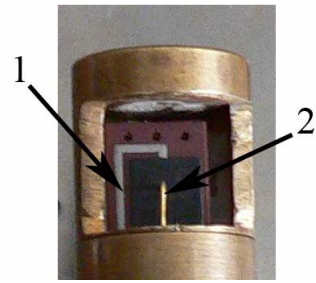


Рис. 1. Образец пленки, установленный в экранирующей обойме, с боковым (*1*) и игольчатым зондовым (*2*) электродами

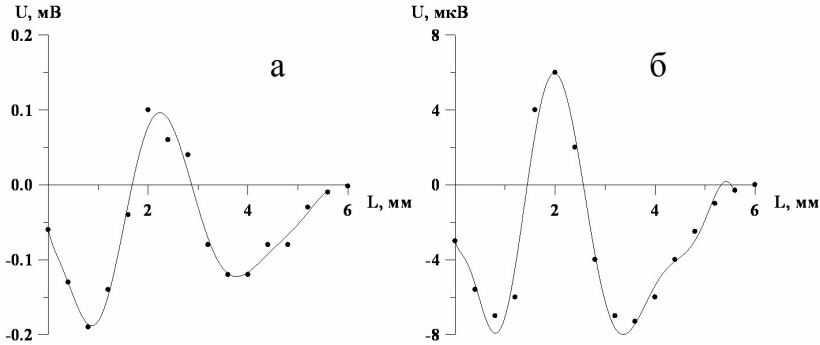


Рис. 2. Зависимость напряжения от координаты места падения луча лазера для Ag-Pd-пленки с одним боковым и одним центральным электродом до обработки в водородосодержащей среде (*а*) и после обработки водородом (*б*)

Таким образом, под действием лазерного излучения в серебро-палладиевых резистивных пленках возникает термо-ЭДС. Модификация поверхности пленок в водородосодержащей среде существенно уменьшает величину возникающего сигнала. Проведенные исследования указывают на возможность применения серебро-палладиевых резистивных пленок в качестве термоэлектрических датчиков водорода.

Список литературы

1. *Смирнов*, *В. И.* Физико-химические основы технологии электронных средств : учеб. пособие. − Ульяновск : УлГТУ, 2005. − 112 с.

2. *Красов*, *В. Г.* Толстопленочная технология в СВЧ микроэлектронике / В. Г. Красов, Г. Б. Петраускас, Ю. С. Чернозубов. – М. : Радио и связь, 1985. – 168 с.

3. *Мышкин*, *Н. К.* Электрические контакты / Н. К. Мышкин, В. В. Кончиц, М. Браунович. – Долгопрудный : Интеллект, 2008. – 558 с.

4. *Калюжный*, *Д. Г.* Применение наноструктурированных серебро-палладиевых резистивных пленок для точного позиционирования фокусированного лазерного излучения / Д. Г. Калюжный, В. А. Александров // Приборы и техника эксперимента – 2015. – № 3. – С. 102–104.

5. *Александров*, *В. А*. Влияние водорода на проводимость Ag-Pd толстопленочных резисторов / В. А. Александров, Д. Г. Калюжный, Е. В. Александрович // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39, № 1. – С. 88–94.

Surface Modification of Ag-Pd Thick Resistive Film

Produced chemical modification of the surface silver-palladium thick film resistive element through the hydrogen treatment of the sample material. Dependences voltage appearing on the element when exposed to the surface of 10.6 μm wavelength laser light. It is shown that a detectable signal is significantly reduced after treatment with hydrogen resistive element.

Keywords: resistive films; surface modification; laser radiation; silver; palladium; semiconductor

УДК 535.3

Р. Ю. Кривенков, аспирант, младший научный сотрудник
Г. М. Михеев, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник
E-mail: roman@udman.ru
Институт механики УрО РАН, г. Ижевск

Оптическое ограничение мощности в суспензиях детонационных наноалмазов, многослойных углеродных нанотрубок и желтом фильтре ЖС18

Разработана и создана лазерная система, позволяющая исследовать нелинейно-оптические свойства жидкостей и твердых прозрачных тел методом z-сканирования с высокой точностью. Представлены результаты z-сканирования водной суспензии детонационных наноалмазов, многослойных углеродных нанотрубок (УНТ) и желтого фильтра ЖС18, обладающих свойством оптического ограничения. Определены пороги оптического ограничения мощности в указанных материалах.

Ключевые слова: *z*-сканирование; нелинейное поглощение; детонационные наноалмазы; многослойные углеродные нанотрубки; желтый фильтр ЖС18; оптическое ограничение мощности

Введение

Одним из методов исследования нелинейно-оптических свойств материалов является так называемый метод *z*-сканирования. Техника *z*-сканирования позволяет получать информацию о коэффициентах нелинейного пропускания и нелинейной рефракции в прозрачных средах. К таким средам относятся суспензии углеродных наноматериалов, а также цветные стеклянные фильтры. Основное преимущество данного метода состоит в возможности разделения вкладов нескольких нелинейно-оптических эффектов и простоте их оценки [1, 2]. Эффекты нелинейной рефракции, поглощения и рассеяния, в том числе обусловленные нелинейностями различных порядков, могут быть разделены и определены в одном цикле измерений.

Хорошо известно, что суспензии различных наноуглеродных материалов обладают свойством оптического ограничения мощности (ООМ), которое может быть использовано для создания приборов и устройств для защиты светочувствительных объектов от воздействия

© Кривенков Р. Ю., Михеев Г. М., 2017
Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-42-180147_р_урал_а).

мощных световых потоков [3, 4]. В частности, существует большое количество работ по ООМ в суспензиях углеродных нанотрубок (УНТ) [5–7].

В то же время известно, что цветные оптические фильтры широко используются в экспериментальной технике, и некоторые из них проявляют нелинейно-оптические свойства [8]. К ним относятся желтые фильтры из цветного стекла ЖС18, содержащие микрокристаллиты $CdS_{1-x}Se_x$ [9].

Целью данной работы является исследование и сравнение эффективности ООМ в водной суспензии детонационных наноалмазов (ДНА), многослойных УНТ и в цветном фильтре ЖС18 на длине волны 532 нм.

Описание эксперимента

Методика *z*-сканирования заключается в измерении коэффициента оптического пропускания исследуемого образца при его перемещении вдоль оси сфокусированного пучка лазера.

В случае использования одночастотного YAG:Nd^{3+}-лазерного источника при *z*-сканировании исследуемого образца с непросветленными входными поверхностями возможно случайное изменение коэффициента оптического отражения от исследуемого образца из-за случайного скачкообразного изменения частоты продольной моды лазера, приводящего к изменению интерференционной картины отраженных пучков от передней и тыльной поверхностей образца. Для уменьшения влияния интерференции на результаты измерений была использована схема эксперимента согласно [10], отличительной особенностью которой является расположение образца наклонно (под углом 45°) по отношению к падающему лазерному пучку. Эксперименты проводились на длине волны 532 нм второй гармоники лазера при длительности импульсов 13,5 нс.

Многослойные УНТ были синтезированы методом электродугового испарения графита. Для получения водной суспензии синтезированные УНТ были очищены и химически модифицированы по методике, описанной в [11, 12]. Исследование строения наночастиц суспензии на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6700F показало, что большинство УНТ имеет диаметр 15–20 нм и длину менее 1 мкм [13]. Суспензия УНТ с концентрацией 0,01 вес.% была помещена в стандартную плоскопараллельную оптическую кювету с непросветленными входными поверхностями рабочей толщиной 1,055 мм и толщиной стенок по 1 мм. На длине волны 532 нм линейный коэффициент пропускания исследуемой суспензии составил 8,1 %.

Детонационные наноалмазы впервые были синтезированы в России в 1963 г. из углерода сильных взрывчатых веществ. Они обладают рядом уникальных свойств и в настоящее время используются в различных областях науки. В настоящей работе были использованы водные суспензии ДНА с концентрацией 1 % по весу. Они получены по технологии, представленной в [14]. Средний размер кластеров ДНА в воде составлял 50 нм. Линейный коэффициент оптического пропускания суспензии ДНА в оптической кювете 1 мм на длине волны 532 нм составил 30 %.

Для исследований нелинейно-оптических свойств оптических фильтров, изготовленных из цветных неорганических стекол (ГОСТ 9411–81), был выбран желтый фильтр ЖС18 толщиной 3 мм. На длине волны 532 нм линейный коэффициент пропускания фильтра составил 83,2 %.

Результаты эксперимента и анализ

Результаты *z*-сканирования образцов можно видеть на рис. 1.

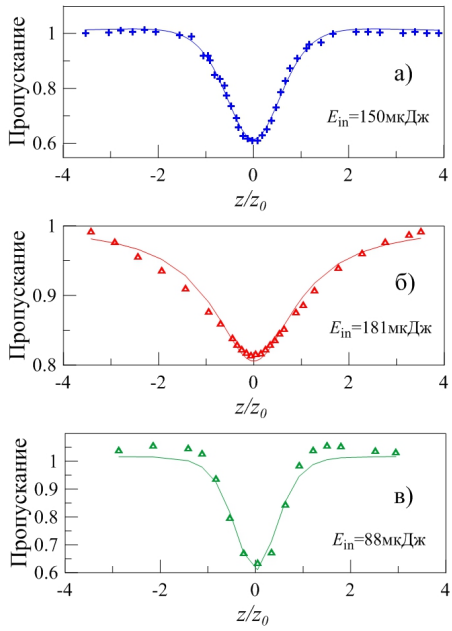


Рис. 1. Зависимости коэффициентов нелинейного пропускания суспензии многослойных УНТ (*а*) и ДНА (*в*), а также цветного фильтра ЖС18 (*б*) в зависимости от положения образца относительно перетяжки

Следует отметить, что зависимость коэффициента нелинейного пропускания принято приводить по отношению к z/z_0, где z_0 – длина Релея, $z_0 = \pi w_0^2/\lambda$, w_0 – радиус пучка в перетяжке.

Можно видеть, что в области перетяжки сфокусированного пучка лазера во всех трех случаях наблюдается провальное уменьшение коэффициента пропускания.

Аппроксимация результатов эксперимента основывается на известной формуле двухфотонного поглощения:

$$\frac{dI(z)}{dz} = \alpha(z) I(z) = \left(\alpha_{ns} + \beta I(z)\right) I(z), \qquad (1)$$

где $I(z)$ – интенсивность падающего излучения; α_{ns} – линейный коэффициент поглощения; β - коэффициент, характеризующий двухфотонное поглощение.

Путем несложных преобразований из нее может быть получена явная формула для $I(z)$ [3], которая и была использована при аппроксимации.

Из рис. 1 видно, что полученные экспериментальные зависимости хорошо аппроксимируются формулой (1). Небольшое отклонение экспериментальных точек можно объяснить влиянием нелинейного рассеяния, которое не было учтено в формуле. Найденное значение коэффициента β, характеризующего двухфотонное поглощение, в оптическом фильтре ЖС18 составило $0{,}13 \pm 0{,}02$ см/МВт.

Чтобы определить пороги оптического ограничения образцов, была построена зависимость нелинейного пропускания от плотности энергии (рис. 2). Следует отметить, что пороговую плотность энергии I_{thr} ООМ принято определять по некоторому фиксированному уровню нелинейного коэффициента пропускания, например, по уровню 0,9. В данном случае указанный уровень для исследуемых суспензии ДНА, УНТ и фильтра ЖС18 достигается при плотностях энергии 1,52, 0,86 и 0,62 Дж/см2 соответственно.

Хороший оптический ограничитель мощности при максимальном значении линейного коэффициента пропускания должен обладать минимальным значением I_{thr}. Очевидно, что I_{thr} оптического ограничения мощности в суспензиях возрастает при уменьшении концентрации наночастиц (см., например, [15]). В связи с этим для определения подходящего материала для создания оптического ограничителя мощности необходимо проводить исследования с суспензиями наноуглеродных частиц, имеющих коэффициенты линейного пропускания не ниже

50 %. В нашем случае линейные коэффициенты пропускания водной суспензии многослойных УНТ, ДНА и желтого фильтра ЖС18 составляли 8,1, 30 и 83,2 % соответственно, Следовательно, для увеличения линейного коэффициента пропускания суспензии УНТ и ДНА до 83,2 % необходимо уменьшать концентрации наночастиц или длину нелинейного взаимодействия (рабочую толщину кюветы), что соответственно приведет к дальнейшему увеличению I_{thr} этих суспензий. С учетом результатов, представленных на рис. 2, это означает, что при равных значениях линейного пропускания исследованных материалов желтый фильтр ЖС18 обладает значительно меньшим значением пороговой интенсивности ООМ на длине волны 532 нм, чем водные суспензии УНТ и ДНА.

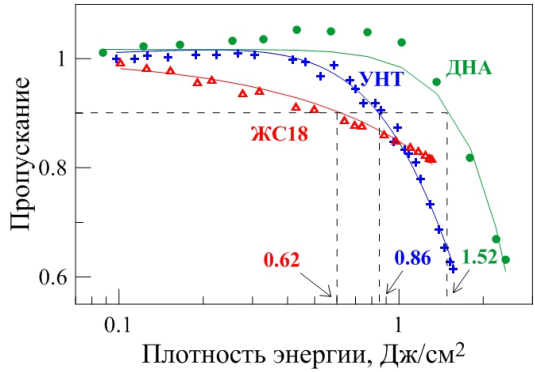


Рис. 2. Зависимости коэффициента нелинейного пропускания образцов от плотности энергии импульса лазера

Заключение

На примере исследований оптического ограничения мощности в водной суспензий многослойных углеродных нанотрубок и детонационных наноалмазов, также в оптическом желтом фильтре ЖС18 продемонстрирована работоспособность наносекундной системы *z*-сканирования на длине волны 532 нм, созданной на базе одномодового одночастотного YAG:Nd^{3+}-лазера с пассивной модуляцией добротности. Показано, что оптический желтый фильтр ЖС18 обладает меньшей пороговой плотностью энергии оптического ограничения мощности, чем водные суспензии многослойных углеродных нанотрубок и детонационных наноалмазов, имеющие одинаковый с ним линейный коэффициент пропускания.

Список литературы

1. Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam / M. Sheik-Bahae, A. A. Said, T. H. Wei [et al.] // IEEE J. Quantum Electron. – 1990. – V. 26, № 4. – P. 760–769.

2. Single-Beam Z-Scan: Measurement Techniques and Analysis / P. B. Chapple, J. Staromlynska, J. A. Hermann [et al.] // J. Nonlinear Opt. Phys. Mater. – 1997. – V. 6, № 3 – P. 251–293.

3. *Mansour*, *K.* Nonlinear optical properties of carbon-black suspensions (ink) / K. Mansour, M. J. Soileau, E. W. Van Stryland // The Journal of the Optical Society of America B. – 1992. – V. 9, № 7. – P. 1100–1109.

4. Modified carbon nanotubes as broadband optical limiting nanomaterials / K. C. Chin, A. Gohel, H. I. Elim [et al.] // Journal of Materials Research. – 2006. – V. 21 – P. 2758–2766.

5. Формы световых импульсов при нелинейном рассеянии лазерного излучения в водной суспензии углеродных нанотрубок / Г. М. Михеев, Т. Н. Могилева, А. В. Окотруб [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 36, № 5. – С. 1–10.

6. Near-infrared saturable absorption of single-wall carbon nanotubes prepared by laser ablation method / Y. Sakakibara, S. Tatsuura, H. Kataura [et al.] // Japanese Journal of Applied Physics. – 2003. – V. 42 – P. 494–496.

7. Нелинейное пропускание одностенных углеродных нанотрубок в тяжелой воде на длине волны 1,54 мкм; получение режима самосинхронизации мод в лазере на стекле с Er^{3+} с помощью пассивного затвора на основе этих нанотрубок / Н. Н. Ильичев, Е. Д. Образцова, С. В. Гарнов, С. Е. Мосалева // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34, № 6. – С. 572–574.

8. Two-photon absorption and nonlinear refraction in commercial colour glass filters / K. S. Bindra, R. Chari, V. Shukla [and et al.] // J. Opt. A Pure Appl. Opt. – 1999. – V. 1. – P. 73–76.

9. А. с. П№ 1797963 СССР Просветляющийся оптический фильтр / И. В. Бондарь, В. А. Зюльков, С. Г. Котов [и др.]. – Бюл. № 2 от 15.01.93.

10. *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. 46, № 8. – С. 719–725.

11. Исследование термических и механических свойств композитов из электродуговых углеродных нанотруб и термостойкого связующего на основе цианового эфира / А. В. Окотруб, Н. Ф. Юданов, В. М. Алексашин [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Сер. А.. – 2007. – Т. 49, № 6. – С. 1049–1055.

12. Регулирование длительности наносекундных лазерных импульсов с помощью суспензии углеродных нанотрубок / Г. М. Михеев, В. В. Ванюков, Т. Н. Могилева, А. В. Окотруб // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – № 6 – С. 81–85.

13. Нелинейное рассеяние света в суспензии углеродных нанотрубок / Г. М. Михеев, Т. Н. Могилева, А. В. Окотруб [и др.] // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40, № 1. – С. 45–50.

14. Влияние размерного фактора наноалмазов в суспензиях на оптическое ограничение мощности и нелинейное рассеяние лазерного излучения / Г. М. Михеев, А. П. Пузырь, В. В. Ванюков [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39, № 5. – С. 1–10.

15. 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, A. P. Puzyr, V. S. Bondar, Y. P. Svirko // Optical Materials. – 2014. – V. 37. - P. 218–222.

Optical Limiting in the Suspensions of Detonation Nanodiamonds, Multiwalled Carbon Nanotubes and Yellow Filter ZhS18

A laser system allowing studying nonlinear optical properties of liquids and transparent solids using z-scan technique with high accuracy has been developed and created. The results of z-scanning of aqueous suspensions of detonation nanodiamonds and multi-walled carbon nanotubes as well as yellow filter ZhS18 which possess optical limiting properties are presented. The optical limiting thresholds of these materials are determined.

Keywords: z-scan; nonlinear absorption; detonation nanodiamonds; multiwall carbon nanotubes; yellow filter ZhS18; optical limiting

УДК 57.08.140

М. Ю. Кутузова, аспирант
В. В. Мирошников, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Приборы»
А. В. Лавренченко, преподаватель-стажер кафедры «Приборы»
E-mail: dahl.pribory@yandex.ru
Луганский национальный университет имени Владимира Даля

Моделирование процесса контроля динамических характеристик нанобиологических объектов

Рассматривается актуальность использования поверхностно-плазмонного резонанса при исследовании разного рода биологических взаимодействий в наносенсорах.

Ключевые слова: поверхностно-плазмонный резонанс; наночастица; нанобиосенсор; поверхностные плазмоны; поверхностная волна

Создание аналитического сенсорного оборудования с использованием поверхностно-плазмонного резонанса (ППР) при исследовании разного рода биологических взаимодействий является актуальной задачей. Приборы с использованием ППР конкурируют в чувствительности с традиционными приборами, использующими методики с применением радиоактивных, ферментных, флуоресцентных меток для детектирования молекул, которые принимают участие в реакции. Они имеют ряд других преимуществ: возможность следить за протеканием реакции в реальном времени, обеспечение большей надежности и достоверности результатов при меньшем числе операций. Последнее достоинство связано с тем, что прямые оптические методы регистрируют непосредственное изменение толщины биомолекулярного слоя на поверхности чувствительного элемента в результате реакции между тестированным компонентом раствора и рецепторным слоем, иммобилизированным на поверхности сенсора.

Поверхностные плазмоны – это поверхностные электромагнитные волны, которые распространяются вдоль границы раздела двух разнородных сред и существуют одновременно в них обеих. Поля, которые переносятся этими волнами, локализованы вблизи поверхности и затухают по обе стороны от нее.

В простом и, вместе с тем, важном модельном случае поверхностные волны рассматривают на плоской границе двух однородных изо-

© Кутузова М. Ю., Мирошников В. В., Лавренченко А. В., 2017

тропных сред без потерь, одна из которых является диэлектриком ($\varepsilon_1 = n_1^2$), а другая – так называемой поверхностно-активной средой, у которой $\varepsilon_2 < 0$, причем $|\varepsilon_2| > \varepsilon_1$. Если искать решение уравнений Максвелла для модельной системы со стандартными граничными условиями: непрерывностью тангенциальных компонентов электрического и магнитных полей и нормальных компонентов индукции во время перехода через границу раздела между средами, то связное решение в виде волны, которая бежит вдоль поверхности, существует только для ТМ-моды (*transverse – magnetic*).

Такая ТМ-волна является неоднородной, у нее распределение каждого из компонентов U электрического и магнитных полей на частотах ω в плоскости, бегущей вдоль оси X, имеет вид (рис. 1)

$$U_0 \exp\left(\pm k_{1,2} z\right) \cos\left(\omega t - k_s x\right), \tag{1}$$

где U_0 – амплитуда; $k_{1,2} > 0$ – коэффициенты затухания поверхностных волн в средах 1 и 2; t – время. Знак (+) относится к среде 1 ($z \le 0$), а знак (–) – к поверхностно-активной среде 2 ($z \ge 0$).

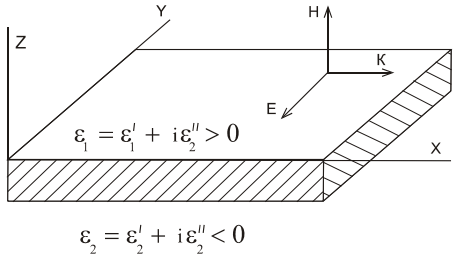


Рис. 1. Схема распространения продольной волны

Для этих волн из граничных условий дисперсионные соотношения равны:

$$k_s = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_1 |\varepsilon_2|}{|\varepsilon_2| - \varepsilon_1}}; \;\; k_{1,2} = k_0 \frac{|\varepsilon_{1,2}|}{|\varepsilon_2| - \varepsilon_1}, \tag{2}$$

где $k_0 = \dfrac{\omega}{e}$ – волновой вектор в вакууме.

Основные оптические свойства металлов определяются свойствами электронов. Электроны не могут просто выйти из металла, для этого нужно осуществить работу выхода. Поэтому если электрическая со-

ставляющая электромагнитной волны будет перпендикулярна поверхности, то она не приводит к возбуждению поверхностных волн, т. к. электроны будут утрачивать энергию на потенционном барьере. Если же электрическая составляющая поля будет параллельна поверхности, то она нарушает колебания электронов в этом же направлении, где нет никакого потенционного барьера, причем движутся они так, что создаваемое ними поле является противоположным по направлению к внешнему электрическому полю. Этим и определяется негативная проводимость в металлах. Электроны в металле частично экранируют внешнее поле, и оно проникает в металл на глубину, значительно меньшую, чем длина волны. Однако если частота внешнего поля будет настолько большой, что электроны не будут успевать реагировать, то металл становится прозрачным. Характерная частота, при которой это происходит, называется плазмонной частотой [1].

Формула, которая показывает зависимость диэлектрической проницаемости металла от частоты, имеет вид:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega^2 p}{\omega(\omega + i\gamma)}, \tag{3}$$

где ωp – плазмонная частота; γ – частота столкновений.

Основное условие возбуждения – это условие фазового синхронизма. Фазовый синхронизм – это равность фазовых скоростей падающей волны и поверхностной волны.

Из дисперсионных соотношений видно, что нельзя возбудить поверхностные волны в металлической пластине волной, падающей из вакуума. Существует 2 способа возбуждения поверхностных волн:

а) нарушенное полное внутреннее отражение;

б) создание резонансных структур на поверхности.

Нарушенное полное внутреннее отражение известно еще как оптический туннельный эффект. При нем на границе диэлектрика при угле падения, большему, чем угол полного внутреннего отражения, возникают поверхностные волны, которые потом превращаются в объемные отраженные волны. Но при выполнении условий фазового синхронизма на границе с металлом эти волны могут превращаться в поверхностные волны металлической пластинки. Это явление является основой примененного возбуждения поверхностных волн. Угол падения выбирается из известного в оптике условия:

$$\theta > \arcsin\left(\varepsilon_1/\varepsilon_3\right)^{1/2}, \ \varepsilon_1 < \varepsilon_3, \tag{4}$$

где ε_3 – диэлектрическая проницаемость материала призмы.

Метод существует в двух модификациях: геометрия Отто и геометрия Кречмана (рис. 2).

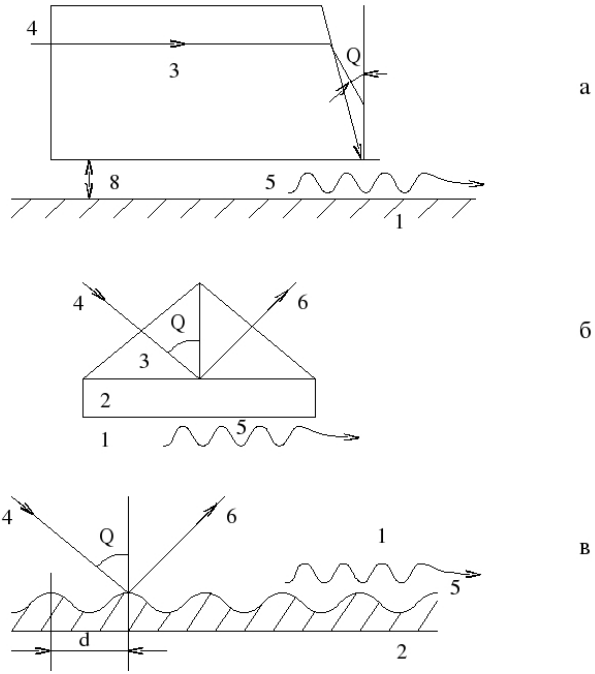


Рис. 2. Возбуждение поверхностных волн светом: *а* – призменный метод геометрии Отто; *б* – призменный метод геометрии Кречмана; *в* – решеточный метод: *1* – диэлектрик (воздух); *2* – поверхностно-активная среда; *3* – призма; *4* – падающее излучение; *5* – поверхностная волна; *6* – зеркальное отражение излучения; *7* – решетка; *8* – зазор размером ~ χ; *d* – период решетки

Этим методом поверхностная волна возбуждается на гладкой поверхности, т. к. при трансформации объемного излучения в поверхностную волну удается согласовать их волновые векторы. В большинстве случаев источником света в соответствующих устройствах генерации поверхностной волны являются лазеры.

Эффективность превращения падающего объемного излучения в схеме Отто, чаще применяемой для ИК-области спектра, достигает десятых доль, в геометрии Кречмана для видимой части спектра эффективность превращения практически доходит до 1. Однако в последнем случае выведение поверхностной волны за пределы призмы

затруднено, и поверхностно-активная среда обычно наносится на ее уровень в виде тонкой пленки. Обратное превращение поверхностной волны в объемное излучение также возможно при помощи призмы.

В другом случае под резонансными структурами понимаются периодические структуры с периодом порядка длины волны поверхностных волн. В таких периодических структурах меняется условие фазового синхронизма.

Возбуждение поверхностных волн приводит к аномалиям Вуда – изменения интенсивности света, который дифрагирует на дифракционной решетке, в отличие от стандартного закона дифракции. На таких периодических структурах существуют плазмоны с большой длиной пробега, т. е. малыми диссипативными потерями.

Поверхностные плазмоны – это коллективные флуктуации электронной плотности на границе обычного диэлектрика с положительной диэлектрической проницаемостью.

Возбуждение поверхностных плазмонов светом определяется как поверхностный плазмонный резонанс для планарных структур с бегущими волнами и локализованный поверхностный плазмонный резонанс для наноразмерных металлических частиц. Спектральная настройка плазмонно-резонансных наночастиц и соотношения между их эффективностями поглощения и рассеяния осуществляется за счет смены размера, формы и структуры частиц. Существует минимум 4 разных механизма обнаружения резонанса при помощи наночастиц, при которых происходит трансдукция макромолекулярних событий в оптические сигналы.

Эти события основаны на изменениях в экстинкции плазмонного резонанса или интенсивности рассеяния, сдвинутых в плазмонном резонансе λ_{max}, или на том и другом. Это следующие механизмы [2]:

– резонансное рассеяние Релея от меток наночастиц, аналогичное меткам флуоресцентного красителя;

– агрегация частиц;

– взаимодействие с перенесением заряда на поверхностях наночастиц;

– смена локального коэффициента преломления.

Нанобиосенсор, который использует эффект плазмонного резонанса, превращает самые мелкие изменения индекса отражения на поверхности металлов в волновые изменения. Сдвиги λ_{max} плазмонного резонанса R можно представить в виде [3]:

$$R = m\left(n_{\text{адс}} - n_{\text{осн}}\right), \tag{5}$$

где m – чувствительность сенсора к индексу отражения; $n_{адс}$ и $n_{осн}$ – индексы отражения адсорбированной и основной среды по отношению к исследуемой связи соответственно. Индекс $n_{адс}$ является средним индексом отражения биотонированного слоя и слоя анализируемого вещества. Его получают методом интегрирования локального индекса отражения каждого слоя $n(z)$ и взвешенной квадратом напряженности локального электромагнитного поля $E(z)$ от нуля до бесконечности:

$$n_{адс} = \frac{2}{l_d} \cdot \int_0^{\infty} n(Z) \cdot E^2(Z) dZ, \tag{6}$$

$$n(Z) = \begin{cases} n_{см} & 0 \le Z \le d_{см}, \\ n_{анал} & d_{см} \le Z \le d_{см} + d_{анал}, \\ n_{осн} & d_{см} + d_{анал} \le Z \le \infty, \end{cases} \tag{7}$$

где $n_{анал}$ и $n_{осн}$ – индексы отражения самосоздающегося монослоя матрицы наночастиц на подкладке сенсора, анализированного вещества и диэлектрического окружения соответственно; d – толщины слоев.

Допуская, что $E(z)$ зависит только от локальной нормали поверхности Z и имеет единую кривую затухания с длиной l_d, что вполне соответствует характеристикам наночастиц, функциональную форму напряженности $E(z)$ можно выразить экспоненциально:

$$E(Z) = \exp\left(\frac{-Z}{l_d}\right). \tag{8}$$

Таким образом, ответ сенсора является разницей смены индекса отражения слоев наночастиц и анализируемого вещества, что выражается в сдвиге пика λ_{max} резонанса, который можно представить в следующем виде:

$$\Delta R = m\left(n_{адс} - n_{осн}\right)\left[\exp\left(-\frac{2d_{см}}{l_d}\right)\right]\left[1 - \exp\left(-\frac{2d_{анал}}{l_d}\right)\right], \tag{9}$$

где $d_{анал}$ – эффективная толщина анализируемого вещества, в соответствии [2]:

$$\frac{d_{анал}}{d_{анал\,max}} = \frac{K_{а.пов}\left[\text{Аналит}\right]}{1 + K_{а.пов}\left[\text{Аналит}\right]}, \tag{10}$$

где $K_{\text{а.пов}}$[Аналит] – константа поверхностного соединения анализируемого вещества; $d_{\text{анал max}}$ – максимальная толщина адсорбированного слоя, зависимая от молекулярной плотности слоя анализируемого вещества, что позволяет выразить анализируемое вещество через отношение отклика сенсора к его максимальному значению $\Delta R/\Delta R_{\max}$.

В соответствии с выражением (10) максимальный отклик плазмонного резонанса нанобиосенсора может быть представлен в виде:

$$\Delta R_{\max} = m\left(n_{\text{адс}} - n_{\text{осн}}\right)\left[\exp\left(-\frac{2d_{\text{см}}}{l_d}\right)\right]\left[1-\exp\left(-\frac{2d_{\text{анал max}}}{l_d}\right)\right]. \quad (11)$$

Таким образом, количественный и качественный ответ нанобиосенсора может быть оценен относительно локального индекса отражения, который превращается в сдвиг $\lambda_{\max}$ плазмонного резонанса.

При превращении излучения в поверхностные волны имеет место узкий резонансный максимум интенсивности поверхностных электромагнитных волн, определяемый условиям согласования векторов поверхностных волн и падающего излучения. В условиях резонанса интенсивность электромагнитного поля в фазе в поверхности металла возрастает на несколько порядков. Это приводит к чрезвычайной чувствительности условий плазмонного резонанса к изменению оптических свойства среды вблизи поверхности металла [3, 4].

Список литературы

1. *Ленинджер*, *А. Л.* Основы биохимии. – Т. 1–3. – М. : Мир, 1985. – 369 с.

2. *Попов*, *Е. М.* Структурная организация белка. – Т. 3. – М. : Наука, 1997. – 604 с.

3. *Парфит*, *Г.* Адсорбция из растворов на поверхностях твердых тел / Г. Парфит, К. Рочестер. – М. : Мир, 1986. – 488 с.

4. *Баскин*, *П.* Компьютерное моделирование в молекулярной нанотехногии // Компьютера. – 1997. – № 41. – С. 34–37.

Modeling of Testing Process of Nanobiological Objects Dynamic Characteristics

In this article relevance of use surface-plasmon a resonance is considered in case of any research of biological interactions in nanosensors.

Keywords: surface-plasmon a resonance; nanoparticle; nanobiosensor; surface wave

УДК 536.2.083

М. М. Мерзляков, магистрант
А. И. Калугин, кандидат физико-математических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Установка для измерения коэффициента температуропроводности методом лазерной вспышки

Рассматривается метод определения коэффициента температуропроводности металлов при помощи импульсного лазерного нагрева. Реализация метода осуществляется на экспериментальной лазерной установке с последующей регистрацией температурного сигнала, мощности и длительности лазерного импульса.

Ключевые слова: метод лазерной вспышки; лазерная установка; коэффициент температуропроводности

В данной работе описана автоматизированная лазерная установка для определения теплофизических характеристик металлов. Сущность метода лазерной вспышки состоит в том, что короткий импульс лучистой энергии поглощается в тонком слое фронтальной поверхности плоского образца. Вызванное этим возмущение температуры регистрируется на тыльной поверности образца (рис. 1) [1].

Метод лазерной вспышки применяется при следующих допущениях (идеальная модель):

1) гомогенный, изотропный образец;

2) стремящаяся к нулю длительность лазерного импульса.

На переднюю поверхность плоского образца (рис. 1) подается тепловой импульс, созданный лазерным излучением.

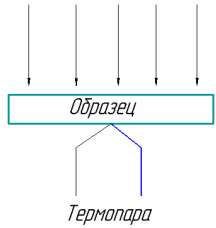


Рис. 1. Метод лазерной вспышки

При этом предполагается, что отсутствуют тепловые потери, импульс мгновенный, а тепловой поток равномерный. В этом случае уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \qquad (1)$$

© Мерзляков М. М., Калугин А. И., 2017

где $T(z, t)$ – температура, являющаяся функцией времени t и координаты z; α – коэффициент температуропроводности.

Решение задачи теплопроводности с начальными условиями:

$$T(0,0) = \frac{Q}{C_p \rho} \text{ и } T(z,0) = 0 \text{ при } 0 \le z \le L \tag{2}$$

будет иметь вид:

$$T(z,t) = \frac{Q}{C_p \rho L}\left[1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} \cos\frac{\pi n z}{L} \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 \alpha t}{L^2}\right)\right], \tag{3}$$

где L – толщина пластины; Q – удельный тепловой поток; C_p – удельная теплоемкость; ρ – плотность образца.

На обратной стороне пластины ($z = L$) в безразмерных величинах выражение (3) можно записать так:

$$\theta = 1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(\pi^2 n^2 F_0\right), \tag{4}$$

здесь $\theta = T/T_{\max}$ имеет смысл безразмерной температуры, где $T_{\max}$ – максимальная температура; $F_0 = \alpha t / L^2$ – критерий Фурье, который имеет смысл безразмерного времени. Зависимость безразмерной температуры от критерия Фурье представлена на рис. 2 [2].

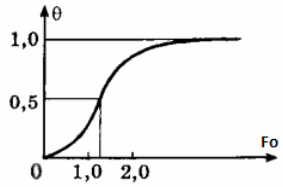


Рис. 2. Зависимость безразмерной температуры от критерия Фурье

Температуропроводность вычисляется обычно по времени достижения значения температуры обратной поверхности половины от максимальной.

При этом

$$\alpha = F_{1/2} \frac{L^2}{t_{1/2}}, \tag{5}$$

где $F_{1/2}$ – критерий Фурье (безразмерное время), при котором безразмерная температура θ образца обратной поверхности достигает половины максимального значения; $t_{1/2}$ – соответствующее время достижения половины максимальной температуры перегрева.

Таким образом, измерив $t_{1/2}$ на обратной поверхности образца, можно вычислить значение коэффициента температуропроводности (рис. 3).

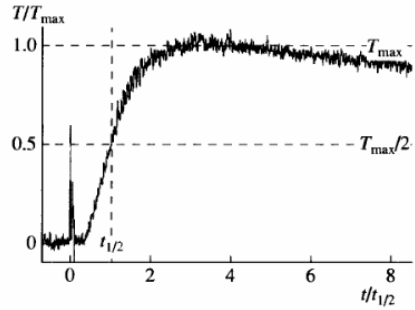


Рис. 3. Нормированная эксперементальная кривая [3]

Метод реализован на экспериментальной усановке, схема которой приведена на рис. 4.

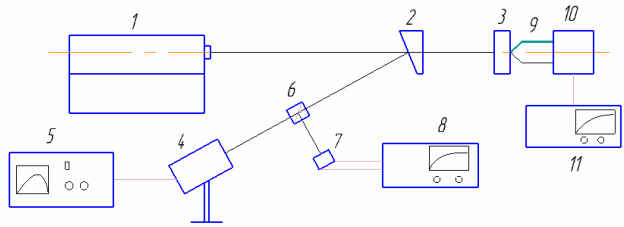


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

В качестве излучателя *1* используется лазерная установка ЛТН 102В. На никелевый образец *3* толщиной 1 мм подается лазерный импульс. Тепловой сигнал регистрируется при помощи хромель-копелевой термопары *9* с толщиной электродов 0,05 мм, привариваемой на обратной поверхности образца. Сигнал с термопары усиливается в блоке усиления *10*. С выхода блока усиления сигнал поступает на вход запоминающего осциллографа *11*.

Оптический клин *2* служит для отведения небольшого процента падающей энергии для измерения энергии падающего излучения и длительности импульса. Светоделительный куб *6* пропускает половину падающего на него излучения на измеритель мощности, а другую направляет на измеритель длительности импульса, которым в нашей установке является фотодиод *7* с осциллографом *8*. Измерителем энергии служит измеритель калориметрический твердотельный ИКТ – 1Н, состоящий из измерительной головки *4* и блока регистрации *5*.

Таким образом, описанная установка позволяет измерять коэффициент температуропроводности, одновременно регистрировать тепловой сигнал, мощность и длительность лазерного импульса.

Список литературы

1. J. Appl. Phys / W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler, G. l. Abbot. – 1961. – Vol. 32, No. 9. – Pp. 1679–1684.

2. *Перевозчиков*, *С. М*. Автоматизированная система измерения теплофизических параметров металлов и сплавов / С. М. Перевозчиков, Л. Д. Загребин // Приборы и техника эксперимента. – 1998. – № 3. – С. 155–158.

3. *Загребин*, *Л. Д*. Измерение температуропроводности и теплопроводности металлов вблизи точки плавления / Л. Д. Загребин, С. В. Бузилов // Приборы и техника эксперимента. – 2003. – № 1. – С. 153–157.

Installation for Measurement of Thermal Diffusivity by the Laser Flash

The method of determining the thermal diffusivity of metals by pulsed laser heating. Method implemented on experimental laser system with subsequent registration of the temperature signal, power and duration of the laser pulse.

Keywords: laser flash method; laser system; thermal diffusivity

УДК 620.179.14

В. В. Мирошников, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Приборы»
Н. С. Булыгин, инженер научно-исследовательской лаборатории «Технической электродинамики»
Н. В. Махортова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборы»
E-mail: dahl.pribory@yandex.ru
Луганский национальный университет имени Владимира Даля

Электромагнитный метод определения глубины залегания дефекта

Разработан вихретоковый преобразователь, способный определять дефекты сложной геометрической формы, а также классифицировать их по глубине и ширине раскрытия. Это дает возможность отслеживать динамику развития дефекта и определять остаточный ресурс работы контролируемого изделия.

Ключевые слова: дефект; вихретоковый преобразователь; модель; датчик

Расчет выходного сигнала накладного вихретокового преобразователя (ВТП) (рис. 1) с дефекта носит полуэмпирический характер в силу отсутствия качественной математической модели распределения вихревых токов в области нахождения дефекта. Разнообразие форм и параметров дефектов не дает возможности непосредственно создать такую модель, которая бы фактически правильно описывала процессы, протекающие в зоне дефекта [1].

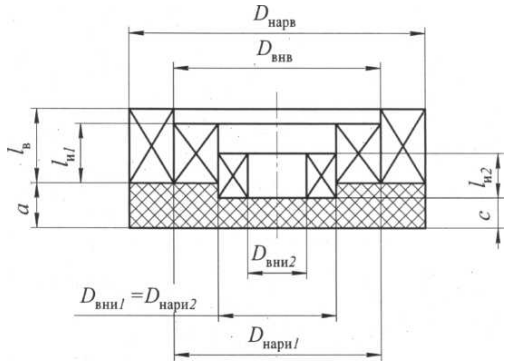
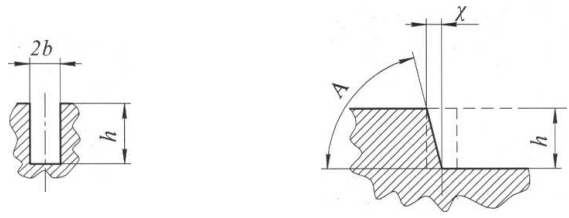


Рис. 1. Геометрическая модель накладного ВТП

© Мирошников В. В., Булыгин Н. С., Махортова Н. В., 2017

Для решения практических задач дефектоскопии предлагается заменить поверхностный дефект ступенькой с уклоном, высота которой будет пропорциональна объему «вынутого» металла. Основными параметрами дефекта будем считать его раскрытие 2*b* и глубину *h* (рис. 2).



а *б*

Рис. 2. Дефекты ОК

При моделировании поверхности объекта контроля (ОК) выбрана форма дефекта в виде ступеньки с уклоном для того, чтобы учесть конечные значения скорости перемещения ВТП по поверхности ОК, а также габаритных размеров преобразователя. Другими словами, данный выбор можно объяснить следующим образом: сцепление поля вихревых токов, наводимых обмоткой возбуждения в ОК с дефектом, при перемещении по поверхности преобразователя происходит не со всей измерительной обмоткой целиком, а только с ее частью, площадь которой при движении ВТП в сторону дефекта увеличивается. Можем считать, что это равнозначно тому, что высота ступеньки для данной модели есть величина переменная, т. е. выбрана ступенька с уклоном. Угол уклона зависит от скорости перемещения ВТП по поверхности ОК, от габаритных размеров обмоток ВТП, а также от глубины дефекта.

Рассмотрим основные моменты работы предложенной модели: считаем, что нам известны все необходимые геометрические размеры ВТП, а также число витков каждой из обмоток преобразователя; также известны параметры тока возбуждения; дана конфигурация дефекта; известен закон движения ВТП по поверхности ОК.

В результате численного решения уравнения Гельмгольца [2] определяем ЭДС холостого хода для данного преобразователя при данном возбуждении:

$$E_0 = jI\omega W_в W_u \mu_o \sqrt{R_в R_u}\,\pi \int_0^\infty J_1\left(\sqrt{\frac{R_u}{R_в}}x\right) J_1\left(\sqrt{\frac{R_в}{R_u}}x\right) \exp\left(\frac{c_x}{\sqrt{R_в R_u}}\right) dx, \quad (1)$$

где ω – круговая частота тока I в обмотке возбуждения датчика; μ_o – магнитная проницаемость вакуума; $W_в$, W_u – число витков возбуждающей и измерительной обмоток; $J_1\left(\sqrt{\frac{R_в}{R_u}}x\right)$, $J_1\left(\sqrt{\frac{R_u}{R_в}}x\right)$ – функции Бесселя первого рода первого порядка; $R_в$, R_u – средние радиусы возбуждающей и измерительной обмоток, $c = (h_u - h_в)$ – расстояние между плоскостями, в которых расположены обмотки.

Для построенной расчетной модели условно разбиваем наши измерительные обмотки (ИО) на равное число элементарных частей (т. н. «срезов» n (рис. 3), полагая, что каждый i-й «срез» вносит равную часть от всей вносимой ЭДС для нашего преобразователя, т. е.:

$$e_{вн\,ik} = \frac{E_{вн\,k}}{n}, \tag{2}$$

где k – номер ИО ($ИО_1$ либо $ИО_2$).

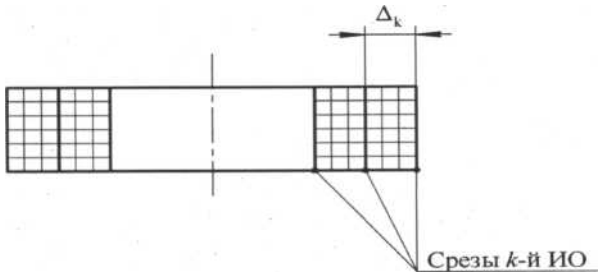


Рис. 3. Разбиение k-й ИО на элементарные части

Каждая компонента вносимой ЭДС $e_{вн\ ik}(\tau)$ определяется из соотношения

$$e_{вн\,ik}(\tau) = \frac{1}{n}\omega I W_в W_{uk}\mu_0 R_k j\pi \times$$
$$\times \int_0^{100} \frac{x\left(x-\sqrt{x^2+j\beta_k^2}\right)-\left(x^2-\sqrt{x^2+j\beta_k^2}\right)\mathrm{th}\left(x\frac{T_{ik}(\tau)}{R_k}\right)}{\left(x+\sqrt{x^2+j\beta_k^2}\right)+\left(x^2-\sqrt{x^2+j\beta_k^2}\right)\mathrm{th}\left(x\frac{T_{ik}(\tau)}{R_k}\right)} G_k(x)dx, \tag{3}$$

где $T_{ik}(x)$ – зазор между i-м срезом k-й ИО и ОК:

$$T_{ik}(\tau)=\begin{cases} t \quad \text{при } r(\tau)-\left[(k-1)\xi+(i-1)\Delta_k\right]<0 \\ t+\left[r(\tau)-\left((k-1)\xi+(i-1)\Delta_k\right)\right]\operatorname{tg}\varphi 10^{-3} \\ \quad \text{при } 0\le r(\tau)-\left[(k-1)\xi+(i-1)\Delta_k\right]<\chi \\ t+h\cdot 10^{-3} \text{ при } \chi\le\left[r(\tau)-\left((k-1)\xi+(i-1)\Delta_k\right)\right]<2b1+\chi \\ \left(t+h\cdot 10^{-3}\right)-\left\{\left[r(\tau)-\left((k-1)\xi+(i-1)\Delta_k\right)\right]-(2b1+\chi)\right\}\operatorname{tg}\varphi\cdot 10^{-3} \\ \quad \text{при } 2\cdot b1+\chi\le r(\tau)-\left((k-1)\cdot\xi+(i-1)\cdot\Delta_k\right)<2B1 \\ t \quad \text{при } r(\tau)-\left((k-1)\xi+(i-1)\Delta_k\right)\ge 2B1 \end{cases} \tag{4}$$

Определяем выходную ЭДС для каждой ИО:

$$U_{\text{вых }k}(\tau)=E_{\text{вн }k}(\tau)-E_{0k}. \tag{5}$$

Находим комплексное выходное напряжение с ВТП:

$$E_{\text{вых1}}(\tau)=U_{\text{вых1}}(\tau)-U_{\text{вых2}}(\tau). \tag{6}$$

По вышеприведенной методике были произведены расчеты в программном пакете *MathCAD 11.0* для ОК в виде бесконечного полупространства с дефектом. Данные для расчетов приведены ниже:

1. Параметры ОВ:

$D_{\text{внв}}=5,70\cdot 10^{-3}\,(м)$, $D_{\text{нарв}}=6.75\cdot 10^{-3}\,(\text{м})$, $W_{\text{в}}=39$ число витков ОВ;

$l_{\text{в}}=4,90\cdot 10^{-3}\,(\text{м})$, $I=372\cdot 10^{-3}\,(\text{А})$ – сила тока возбуждения;

$f=100\cdot 10^{3}\,(\text{Гц})$ – частота тока возбуждения.

2. Параметры $ИО_1$:

$D_{\text{вни1}}=4,25\cdot 10^{-3}\,(\text{м})$, $D_{\text{нари1}}=4,50\cdot 10^{-3}\,(\text{м})$, $W_{u1}=13$ – число витков $ИО_1$;

$l_{u1}=2,50\cdot 10^{-3}\,(\text{м})$, $n=0,85(\text{мм})$.

3. Параметры $ИО_2$:

$D_{\text{вни2}}=3,60\cdot 10^{-3}\,(\text{м})$, $D_{\text{нари1}}=4,25\cdot 10^{-3}\,(\text{м})$, $W_{u2}=56$ – число витков ИО2, $l_{u2}=4,90\cdot 10^{-3}\,(\text{м})$, $n=0,85(\text{мм})$.

4. Общие параметры для ВТП: n = 5, $t=0,1\cdot 10^{-3}$ (м) – зазор между рабочей поверхностью и плоскостью ОК, V = 50 (мм/с) – скорость движения ВТП по поверхности ОК.

5. Параметры дефекта: h = 0,5 (мм), $2b$ = 0,5 (мм), A = 80°, μ = = 1790,49 – относительная магнитная проницаемость материала ОК, $\sigma_{oc} = 10{,}3 \cdot 10^6$ (см/м) – удельная электрическая проводимость материала ОК.

Результаты вычислений изображены в виде графика (рис. 4).

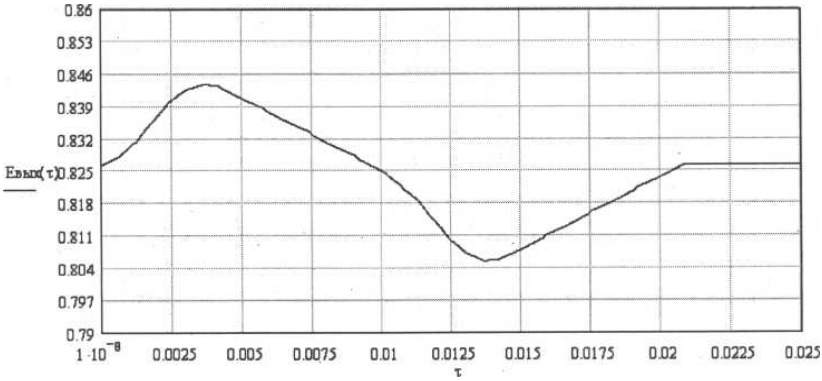


Рис. 4. Зависимость выходной ЭДС ВТП для ОК с дефектом глубиной h = 0,5 мм и раскрытием $2b$ = 0,5 мм

Подобные расчеты проводились для дефектов разной глубины. Графики полученных зависимостей приведены на рис. 5.

В графиках на рис. 5 приведена только левая часть сигнала вследствие квазисимметричности зависимости выходной ЭДС от перемещения датчика относительно дефекта.

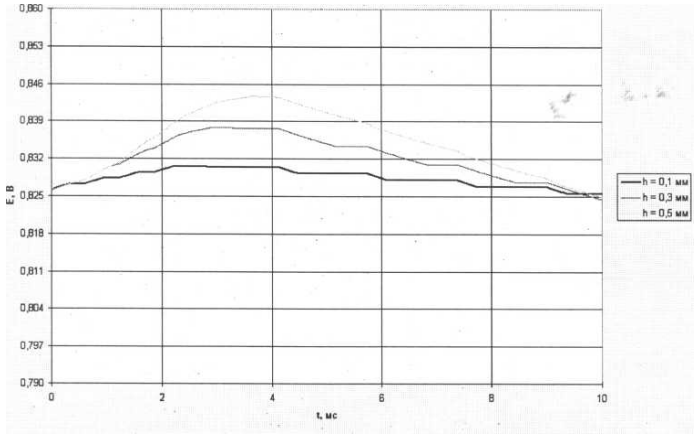
Помимо этого, для дефекта глубиной 0,5 мм был произведен расчет выходной ЭДС, которая наводится в датчиках различного диаметра. Моделирование габаритных размеров датчиков производилось пропорциональным увеличением диаметров обмоток, остальные параметры (такие, как, например, расположение обмоток друг относительно друга либо число витков) оставались в расчетах неизменными.

Результаты расчетов выполнены в виде графиков (рис. 6).

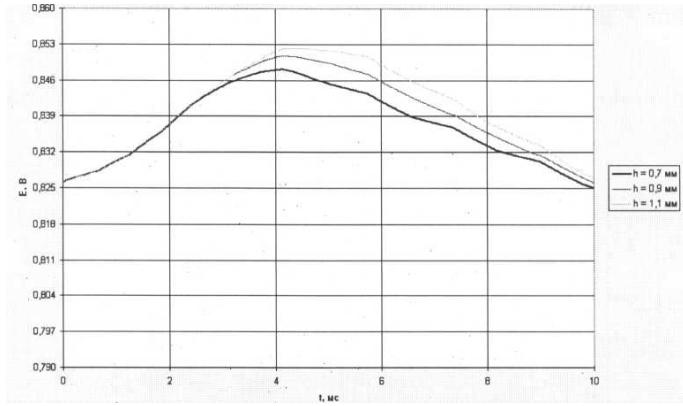
При расчете пиковых значений относительных приращений выходных сигналов для дефектов разной глубины относительно бездефектного участка при их контроле датчиками различных диаметров D = 6,75 мм; D = 10,0 мм; D = 15,0 мм, получили зависимости (рис. 7).

Проведенные исследования показали, что имеется реальная возможность создания ВТП с наперед заданными характеристиками. Это обеспечивает создание унифицированных ВТП (по выходному сигна-

лу), имеющих различные геометрические размеры, что дает возможность комплектовать один дефектоскоп группой датчиков [4].



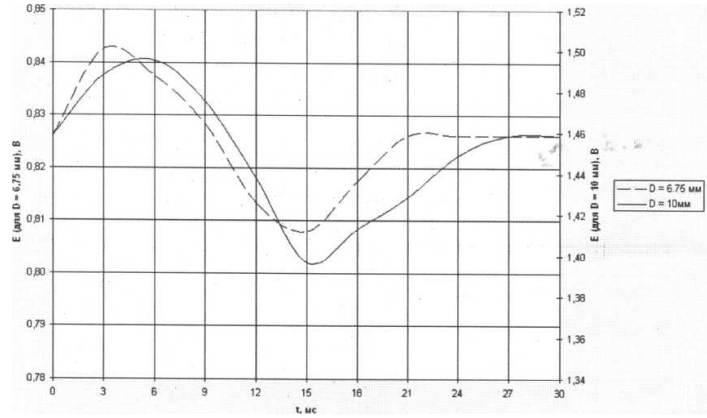
а



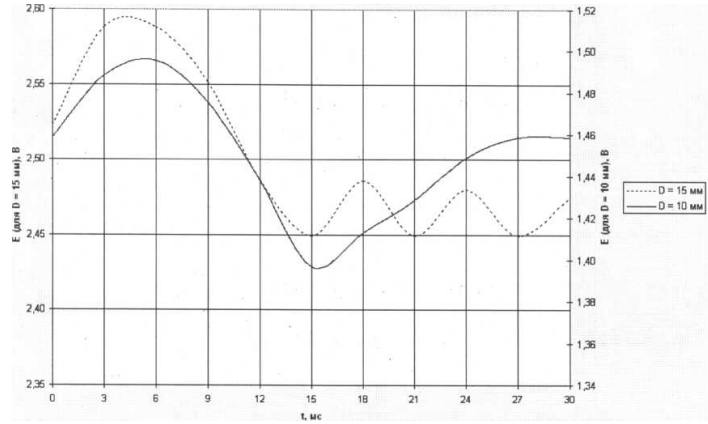
б

Рис. 5. Изменение ЭДС ВТП для дефектов:
а – *h* = 0,l; 0,3 и 0,5 мм; *б* – *h* = 0,7; 0,9 и 1,1 мм

При постоянной скорости перемещения ВТП можно классифицировать дефекты по глубине и ширине раскрытия. Это дает возможность отслеживать динамику развития дефекта и определять остаточный ресурс работы контролируемого изделия [3].



а



б

Рис. 6. График зависимости выходной ЭДС для ВТП:
а – D = 6,75 мм и D =10 мм; *б* – D = 10 мм и D = 15 мм

Для определения глубины залегания дефекта целесообразно использовать набор датчиков различного диаметра. Это особенно важно при выявлении внутренних дефектов в процессе ремонтных работ, когда в процессе обработки изделия имеющийся дефект не вышел на поверхность.

Предложенная конструкция может быть использована в автоматическом или ручном режиме для контроля изделий различной конфигу-

рации (труб, прутков, осей, листов, корпусных изделий и др.), выполненных из ферромагнитного и неферромагнитного материала.

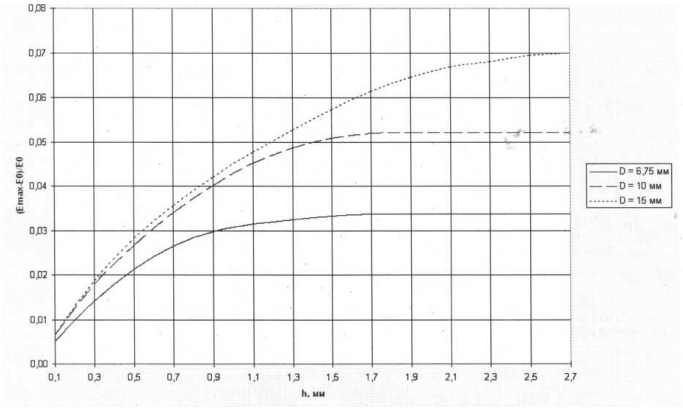


Рис. 7. График зависимости относительного приращения сигнала на дефекте

Список литературы

1. *Клюев*, *В. В*. Расчет токовихревого преобразователя для контроля движущихся объектов // Измерительная техника. – 1974. – № 1. – С. 50–54.

2. *Курбатов*, *П. А*. Численный расчет электромагнитных полей / П. А. Курбатов, А. С. Аринчин. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 168 с.

3. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами / В. Г. Герасимов, Ю. Я. Останин, А. Д. Покровский [и др.]. – М. : Энергия, 1978. – 216 с.

4. *Учанин*, *В. Н*. Вихретоковые накладные преобразователи: расширенная классификация, сравнительный анализ и характерные примеры реализации // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2010. – № 4. – С. 22–28.

Electromagnetic Method for Determining the Depth of the Defect Occurrence

Eddy current transducer designed capable of detecting defects of complex geometric shapes, and classify them according to the depth and width of the disclosure. It makes possible to monitor the dynamics of the defect and to determine the remaining life of the controlled product.

Keywords: defect; eddy current transducer; model; sensor

УДК 681.944

Ю. В. Овчинникова, студентка
E-mail: YVOvchinnikova@yandex.ru
В. П. Усольцев, кандидат технических наук, ведущий инженер-электроник
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Особенности лазерного гравирования изделий из оргстекла

В докладе описывается исследование, проводимое с целью усовершенствования технологии лазерного гравирования оргстекла и дальнейшего принятия решений о выборе режимов работы лазерной установки.

Ключевые слова: органическое стекло; гравирование; лазерные технологии

Органическое стекло, или полиметилметакрилат, – продукт полимеризации метилметакрилата. Оно полностью состоит из термопластичной смолы. На сегодняшний день органическое стекло заслужило отличную репутацию во всем мире.

Широкое применение оргстекла обусловлено его уникальными характеристиками. Оно в 2,5 раза легче обычного стекла, отличается высокой пластичностью, ударопрочностью, стойкостью к химическому и радиационному воздействию. Показатель светопропускания оргстекла достигает 92–93 %, что больше, нежели у других полимерных материалов. При этом степень прозрачности не изменяется со временем. Одним из недостатков органического стекла является его горючесть, но при горении оно не выделяет вредных веществ, следовательно, этот материал является экологически чистым [1].

Вышеперечисленные свойства сделали органическое стекло очень популярным. Данный материал используется во всех сферах человеческой жизнедеятельности. Он широко применяется в осветительной технике, наружной рекламе, торговом оборудовании, сантехнике, строительстве, архитектуре, транспорте, приборостроении, при декоративном оформлении интерьера, медицине и т. д.

Структура и свойства органического стекла напрямую зависят от технологии производства. Данный полимерный материал может быть получен двумя способами: литьем и экструзией [2]. Применяемые технологии производства оргстекла обусловливают широкий диапазон изменения характеристик, определяющих режимы обработки:

© Овчинникова Ю. В., Усольцев В. П., 2017

– наличием разных внутренних напряжений;

– различной ударопрочностью, за счет различной длины молекулярных цепочек;

– различной толщиной листа;

– различной химической стойкостью;

– различной способностью к склеиванию;

– разными затратами на производство и обработку.

Обработка оргстекла весьма разнообразна. Его можно сверлить, резать, гравировать, маркировать, фрезеровать, сваривать и гнуть. Возможности работы с оргстеклом практически ничем не ограничиваются, именно поэтому из этого удивительного материала можно изготовить не просто интересные и необычные изделия, но и уникальные.

В работе проведено исследование режимов лазерного гравирования с учетом особенностей обработки оргстекла в условиях широкого диапазона изменения характеристик используемого материала. На основании патентных исследований, анализа научно-технической литературы, нормативно-технической документации, учебно-методической литературы, отчетов по научно-прикладной тематике и т. д. проведен анализ свойств органического стекла, распространенность изделий из оргстекла, рассмотрены преимущества лазерного гравирования для научно-обоснованного выбора технологических режимов и обоснования динамики развития перспективных направлений лазерного гравирования, проведено исследование влияние лазерного излучения на физические свойства материала, предложены рекомендации по выбору технологических режимов.

На основании изучения теоретико-познавательного материала проведен анализ известных свойств, микроструктуры и строения различных изделий из оргстекла, возможности повышения потребительских свойств изделий при использовании прогрессивной технологии гравирования лазером. Показана необходимость учета особенностей материала, свойств, строения, микроструктуры при выборе параметров лазерного излучения – частоты, разрешающей способности, мощности, скорости перемещения и времени воздействия излучения, угла падения, фокусировки излучения лазерной установки. Обращено внимание на необходимость дальнейшего глубокого исследования проблемы.

При нанесении изображения на оргстекло используют несколько способов, из которых наиболее распространено гравирование. Гравирование (от нем. *gravieren*, франц. *graver* – вырезать на чем-либо) – вырезание изображения, орнамента, надписи и т. п. на поверхности твердых материалов. Первоначально было освоено ручное гравирование абразивным инструментом. Используют следующие технологии

ручного гравирования: гранение, шлифование, резание и выстукивание. В настоящее время ручное гравирование заменяется оборудованием, отличающимся высокой точностью и разрешением. Прогресс породил множество новых технологий, таких как электродуговое, ультразвуковое, электронно-ионное и лазерное гравирование.

Нанесение рисунка на органическое стекло гравированием при помощи лазера является современным методом, который, по сравнению с классическими способами, является наиболее приемлемым и имеет перспективы для дальнейшего совершенствования [3]. Упрощение конструкции лазерных устройств снижает требования к квалификации рабочего и стоимости оборудования, что делает операцию гравирования более доступной и экономичной.

Гравировка лазером может быть получена практически на любых изделиях, состоящих из комбинаций различных материалов – металла, древесины, пластика, картона, кожи, оргстекла, резины и других материалов.

В процессе лазерного гравирования сфокусированный луч с высокой плотностью лазерного излучения осуществляет локальный нагрев материала, что приводит к испарению материала или изменению его цвета в месте воздействия лазерного излучения. Таким образом, возникает определенный рельеф на поверхности материала, глубина которого зависит от времени обработки, мощности лазера и физических свойств обрабатываемого материала.

Особенность лазерной гравировки заключается в том, что нанесенное изображение является частью самого изделия, а не слоем нанесенной краски или напыления. Технология лазерного гравирования позволяет создавать также объемные изображения на поверхности изделия. В зависимости от используемого метода изображение может быть выпуклым (рельефным) или углубленным. Технология объемного лазерного гравирования активно используется в инструментальном производстве при изготовлении пресс-форм, штампов, пуансонов, при изготовлении ювелирной оснастки и ювелирных изделий [4].

При воздействии лазерного излучения на неметаллические материалы на первом этапе происходит нагрев участка материала и его обугливание. После достаточного нагрева материала начинается его термическое разложение на газообразные составляющие. Затем, при продолжении процесса нагрева, разложение материала усиливается и происходит процесс воспламенения. При нагревании оргстекла до 220 °С начинается размягчение материала, в пределах 280–310 °С вещество плавится, температура возгорания превышает 500 °С, пылевидное состояние от 700 °С является взрывоопасным.

Изделие из органического стекла с лазерной гравировкой

Необычные свойства оргстекла под влиянием лазерного излучения заключаются в оплавлении и вспенивании полиметилметакрилата на микроуровне. Образовавшиеся пузырьки на месте среза воспринимаются глазом как матовая поверхность.

Для лазерного гравирования оргстекла используются так называемые газовые лазеры (CO_2 – углекислотный лазер, генерирующий на длине волны 10,6 мкм) [5]. Пример изделия из оргстекла с лазерной гравировкой приведен на рисунке.

В результате проделанной работы показана необходимость учета особенностей лазерного гравирования изделий из оргстекла при разработке более совершенных процессов лазерной обработки.

Сравнительный анализ методов гравирования органического стекла показал, что лазерное гравирование имеет существенные преимущества перед другими методами гравирования. Показана необходимость учета особенностей материала, свойств, строения, микроструктуры при выборе параметров лазерного излучения – частоты, разрешающей способности, мощности, скорости перемещения и времени воздействия излучения, угла падения, фокусировки излучения лазерной установки.

В результате проведенных исследований определены основные параметры и характеристики лазерного гравирования оргстекла: оптимального спектрального диапазона (10,6 мкм) источника излучения для достижения необходимой глубины проникновения оптического излучения в материал, параметров поверхности, эстетических характеристик изображения.

Список литературы

1. *Зверев*, *В. А.* Оптические материалы : учеб. пособие для конструкторов оптических систем и приборов / В. А. Зверев, Е. В. Кривопустова, Т. В. Точилина. – Ч. 2. – СПб. : СПб НИУ ИТМО, 2013. – 248 с.

2. Технология производства. – URL: http://proakril.com/orgsteklo/tehnologiya-proizvodstva (дата обращения: 15.10.2016).

3. *Usoltseva*, *A. V.* The laser engraving in decorative processing of organic glass. Instrumentation engineering, electronics and telecommunications – 2015: Instrumentation Engineering in the XXI Century. Integration of Science, Education and Production // Paper book of the I International Forum IEET – 2015 held within the framework of the XI International Scientific-Technical Conference (November, 25–27, 2015, Izhevsk, Russia). – Izhevsk: Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2016. – 190–194 p.

4. Промышленная лазерная маркировка и гравировка металлических и неметаллических изделий. – URL: http://laser-form.ru/technologies/tehgravirovka.html (дата обращения: 15.10.2016).

5. *Харанжевский*, *Е. В.* Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество / Е. В. Харанжевский, М. Д. Кривилев. – Ижевск : Изд-во Удм. гос. ун-та, 2011. – 188 с.

Features of Laser Engraving of Products Made of Organic Glass

The report describes the research conducted with the purpose of improvement the technology of laser engraving on organic glass, as well as further decision-making on the work modes of the laser system.

Keywords: organic glass; engraving; laser technology

УДК 535.5

Ю. А. Остроух, магистрант, инженер-исследователь
E-mail: ostrouh@udman.ru
Институт механикиУрО РАН, г. Ижевск
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
Р. Г. Зонов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
E-mail: znv@udman.ru
Г. М. Михеев, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник
E-mail: mikheev@udman.ru
Институт механики УрО РАН, г. Ижевск

Одночастотный лазер для исследования нелинейно-оптических эффектов в широком спектральном диапазоне

Представлено описание YAG:Nd^{3+}-лазера с пассивной модуляцией добротности для исследования нелинейно-оптических эффектов в широком спектральном диапазоне. На длине волны 1064 нм лазер обеспечивает генерацию гладких наносекундных световых импульсов с длительностью 22 нс одной поперечной моды. Энергия одночастотного светового импульса составила 40 мДж. Для применения лазера в широком спектральном диапазоне созданы нелинейно-оптические блоки преобразования частоты во вторую, третью и четвертую гармоники.

Ключевые слова: одночастотный лазер; поляризация; нелинейно-оптическое преобразование частоты; форма импульса

Для проведений экспериментальных исследований в области нелинейной оптики часто возникает потребность в одночастотном лазерном источнике, генерирующем световые импульсы наносекундной длительности TEM_{00}-моды, работающем в широком диапазоне длин волн. Это связано с тем, что лазерные импульсы наносекундной длительности TEM_{00}-моды можно сфокусировать и получить пятно с заранее заданным диаметром при большой плотности мощности. Одночастотный режим, т. е. режим одной продольной моды, позволяет получать гладкие световые импульсы. Наличие гладких лазерных импульсов при проведении экспериментов значительно облегчает интерпретацию получаемых результатов. Работоспособность лазера генерировать световые импульсы в широком диапазоне длин волн обеспечивает возможность проведения разнообразных экспериментов

© Остроух Ю. А., Зонов Р. Г., Михеев Г. М., 2017

в инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областях спектра. В данной работе представлены описание и основные характеристики такой экспериментальной установки, созданной на базе YAG:Nd^{3+}-лазера с пассивной модуляцией добротности.

Установка состоит из одночастотного YAG:Nd^{3+}-лазера с пассивной модуляцией добротности и генераторов второй, третьей, четвертой гармоник. Одночастотный YAG:Nd^{3+}-лазер служит в качестве источника наносекундных световых импульсов. Его работа основана на получении излучения в активном элементе, изготовленного из кристалла YAG:Nd^{3+} при накачке лампой ИНП-5/60А-1 [1]. Оптическая схема лазера приведена на рис. 1. По существу лазер представляет собой одномодовый генератор оптических импульсов и два усилителя света, выполненных на одном активном элементе. Резонатор лазера образован плоским «глухим» зеркалом *1* и вогнутым «глухим» зеркалом *2*. Он включает в себя плоскопараллельную пластинку *3*, четвертьволновую пластинку *4*, диафрагму *5*, двулучепреломляющую призму, *6*, пассивный лазерный затвор *7*, активный элемент *8* и диафрагму *9*.

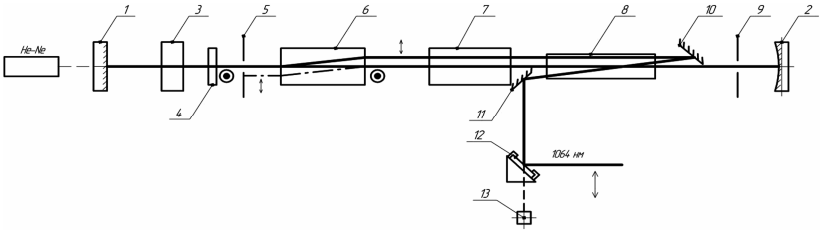


Рис. 1. Оптическая схема резонатора
(⦿ – поляризация перпендикулярная плоскости рисунка)

Вогнутое «глухое» зеркало *2* имеет радиус кривизны R = 2 м. Плоскопараллельная пластина, толщиной 10 мм, установлена параллельно «глухому» зеркалу *1*. Двулучепреломляющая призма изготовлена из кальцита размером 15×15×31,1 (θ = 48°, φ = 45°). Активный элемент с просветленными на длине волны 1064 нм плоскопараллельными поверхностями имеет вид стержня размером ∅ 6,3×65 мм. Пассивный лазерный затвор, выполненный из кристалла LiF:F_2 с начальным коэффициентом пропускания 14 %, обеспечивает генерацию гигантских импульсов, т. е. наносекундных импульсов. Четвертьволновая пластинка установлена под малым углом к глухому зеркалу *1*. Длина резонатор составила L = 1,42 м. He-Ne лазер служит для юстировки резонатора.

Регистрация временной формы световых импульсов проводилась по следующей схеме (рис. 2).

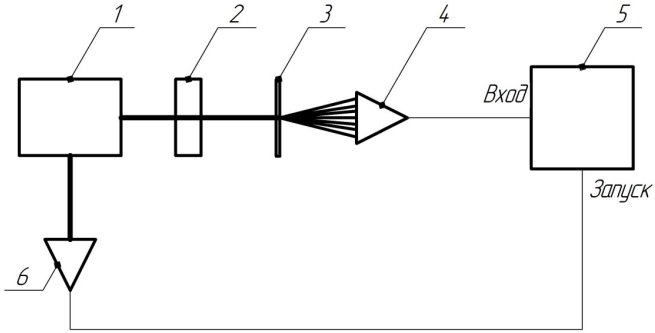


Рис. 2. Схема регистрации импульсов

Излучение лазера *1* через набор нейтральных фильтров *2* и рассеивающий фильтр (матовое стекло) *3* направляется на быстродействующий фотодиод *SIR-5* (*ThorLabs*) *4*. Время нарастания переднего фронта фотоприенмника составляет 60 пс. Рассеивающий фильтр *3* обеспечивает равномерное освещение светочувствительной поверхности быстродействующего фототдиода, и тем самым достигается правильное определение временной формы лазерных импульсов. Сигнал с фотодиода поступает на вход широкополосного цифрового осциллографа TDS7704B (TEKTRONIX) (полоса пропускания 7 ГГц) *5*. Часть излучения лазера падает на лавинный фотодиод ЛФД-2 (*6*, позиция *13* на рис. 1), служащий для запуска цифрового осциллографа.

Полоса контура усиления активного элемента YAG:Nd^{3+} на длине волны 1064,18 составляет 0,78 нм (около 6,9 $см^{-1}$) [2]. При оптической длине резонатора лазера это во много раз превышает разность частот между продольными модами резонатора лазера (0,003 $см^{-1}$). По этой причине пассивный лазерный затвор, служащий для получения «гигантских» импульсов, формирует несколько продольных мод, которые случайным образом меняются от вспышки к вспышке лазера. В результате генерируемый световой импульс имеет сложную временную форму, которая случайным образом меняется от вспышки к вспышке лазера (рис. 3) [3].

Для того что бы устранить многочастотный режим генерации и получить пучок, близкий к гауссовой форме, была установлена плоскопараллельная пластина.

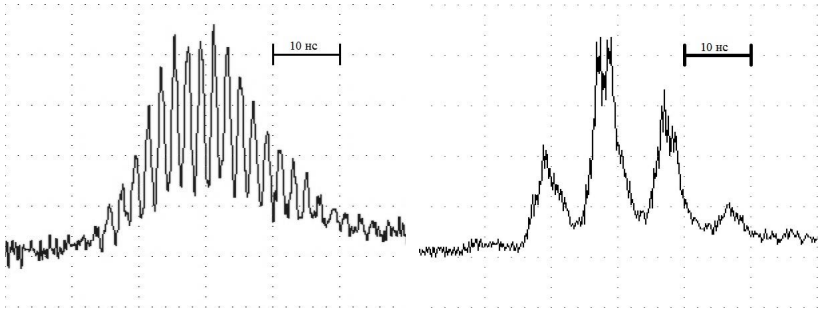


Рис. 3. Форма импульсов многочастотного режима генерации

Лазер работает следующим образом. Излучение люминесценции активного элемента после просветления пассивного затвора проходит через пассивный лазерный затвор, далее попадает на двулучепреломляющую призму. В двулучепреломляющей призме пучок света разделяется на обыкновенную и необыкновенные составляющие, имеющие горизонтальную и вертикальную поляризации. Пучок с вертикальной поляризацией поглощается диафрагмой *5*. Далее свет проходит через четвертьволновую и плоскопараллельную пластинки. После этого свет становится эллиптически поляризованным. Степень эллиптичности определяется ориентацией оптических осей четвертьволновой пластины относительно вертикальной плоскости. Затем свет отражается от глухого зеркала *1*, снова проходит через плоскопараллельную и четвертьволновую пластину. В результате этого свет снова приобретает линейную поляризацию. Однако плоскость его поляризации в общем случае будет отличаться от горизонтальной. Это зависит от ориентации четвертьволновой пластины. Таким образом, луч света повторно попадает на двулучеперломлющую призму и снова разделяется на «обыкновенный» и «необыкновенный» лучи. На выходе из двулучепреломляющей призмы образуются два параллельных луча, находящиеся друг от друга расстоянии около 3 мм. Обыкновенный луч, имеющий горизонтальную поляризацию, остается в резонаторе, а необыкновенный, имеющий вертикальную поляризацию, проходит через активный элемент. В результате этого происходит его существенное усиление, т. к. он проходит через неистощенную область активного элемента. Далее свет отражается от «глухого» зеркала *10* и вновь проходит через неистощенную область активного элемента. Тем самым происходит дополнительное многократное усиление импульса света. Далее луч отражается от глухого зеркала *11* и попадает на поворотное

зеркало *12*. Малая часть выходящего излучения попадает на лавинный фотодиод *13*, импульс которого служит для запуска цифрового осциллографа.

На выходе лазера получаем вертикально поляризованное излучение с длиной волны λ_1 = 1064 нм. Временную форму лазерного импульса регистрировали по методике, изложенной выше. Длительность импульса измерялась по полувысоте импульса, τ_1 = 22,1 нс. Форма импульса представлена на рис. 4. Энергия лазерного импульса измерялась с помощью измерителя энергии световых импульсов PM100USB с измерительной головкой ES111C (*ThorLabs*). Энергия лазерного импульса $E_{\lambda 1}$ = 40 мДж. Основные характеристики лазерных импульсов, полученных на длине волны 1064 нм, приведены в таблице.

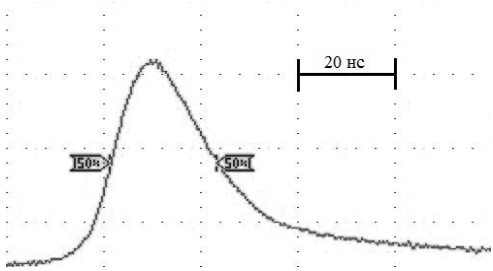


Рис. 4. Форма импульса лазерного излучения длинной волны λ_1 = 1064 нм

Для того чтобы преобразовать излучение первой гармоники с длиной волны λ_1 = 1064 нм в излучение второй гармоники с длиной волны λ_2 = 532 нм ($\omega + \omega \rightarrow 2\omega$), был использован нелинейно-оптический кристалл КТР ($KTiOPO_4$) с просветляющим покрытием для длин волн 1064 + 532 нм [4], вырезанного для преобразования по II типу скалярного *oee* синхронизма, размером 4,3×4,7×7 мм [5].

Оптическая схема преобразования во вторую гармонику приведена на рис. 5. Излучение первой гармоники отражается от плоского «глухого» зеркала *1*, проходит через фазовую пластинку *2* и попадает на кристалл КТР *3*.

Фазовая пластинка служит для поворота поляризации первой гармоники на 45°. Для отсечения излучения первой гармоники после кристалла КТР установлен оптический фильтр СЗС 23 толщиной 5 мм. На выходе фильтра СЗС 23 излучение с длиной волны λ_2 = 532 нм имеет горизонтальную поляризацию. Форма импульса представлена на рис. 6. Параметры лазерных импульсов на длине 532 нм приведены в таблице.

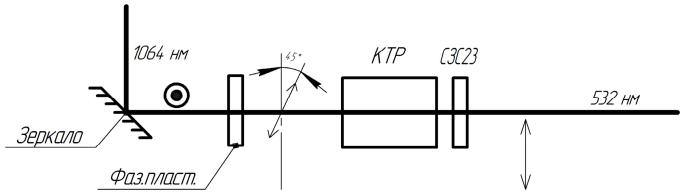


Рис. 5. Оптическая схема преобразования во вторую гармонику (⦿ – поляризация перпендикулярная плоскости рисунка)

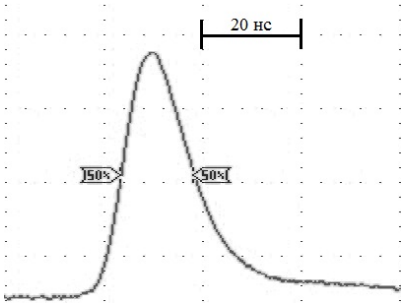


Рис. 6. Форма импульса лазерного излучения на длине волны $\lambda_2 = 532$ нм

Для получения излучения третьей гармоники на длине волны $\lambda_3 =$ $= 355$ нм был использован кристалл BBO (BaB_2O_4), вырезанный по I типу скалярного синхронизма *ooe*, размеры 6×6×7 мм. Оптическая схема преобразования в третью гармонику приведена на рис. 7.

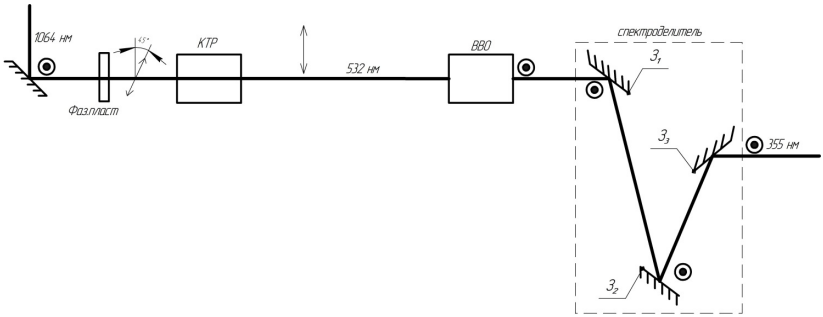


Рис. 7. Оптическая схема преобразования в третью гармонику (⦿ – поляризация перпендикулярная плоскости рисунка)

Излучение третьей гармоники возникает в результате нелинейно-оптического суммирования излучения первой и второй гармоник с вертикальной и горизонтальной поляризациями, соответственно, ($\omega + 2\omega \rightarrow 3\omega$) в нелинейно-оптическом кристалле BBO. Частотная селекция излучения третьей гармоники осуществляется спектроделителем. Спектроделитель состоит из трех диэлектрических зеркал $З_1$, $З_2$, $З_3$, которые преимущественно отражают излучение на длине волны 355 нм. Кроме этого, падающее на них излучение имеет *s*-поляризацию, поэтому оно отражается значительно в большей степени, чем излучение на длинах волн 532 и 1064 нм [6]. На выходе получаем длину волны излучения $\lambda_3 = 355$ нм с вертикальной поляризацией. Форма импульса представлена на рис. 8. Характеристики импульсов лазерного излучения на длине волны 355 нм приведены в таблице.

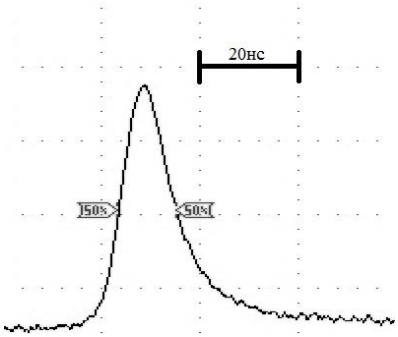


Рис. 8. Форма импульса лазерного излучения на длине волны $\lambda_3 = 355$ нм

Для повышения стабильности выходной энергии кристалл третьей гармоники BBO помещен в термостат (LOTIS TII), который поддерживает стабильную температуру 45 ºС.

Для преобразования излучения второй гармоники с длиной волны $\lambda_2 = 532$ нм, в излучение четвертой гармоники длиной волны $\lambda_4 = 266$ нм, ($2\omega + 2\omega \rightarrow 4\omega$), был использован кристалл BBO (BaB_2O_4), вырезанный по I типу скалярного синхронизма *ooe*, размером 6×6×7 мм. Оптическая схема преобразования в четвертую гармонику представлена на рис. 9.

Горизонтально поляризованное излучение второй гармоники попадает на нелинейный кристалл BBO, на выходе которого возникает излучение четвертой гармоники с вертикальной поляризацией. Излучение второй и четвертой гармоник разделяются двумя диэлектрически-

ми зеркалами $З_1$ и $З_2$, которые преимущественно отражают излучение на длине волны 266 нм. Кроме этого, падающее на них излучение имеет s-поляризацию, поэтому оно отражается значительно в большей степени, чем излучение на длине волны 532 нм. На выходе получаем вертикально поляризованное излучение с длиной волны λ_4 = 266 нм. Форма импульса показана на рис. 10. Характеристики импульсов лазерного излучения на длине волны 266 нм приведены в таблице.

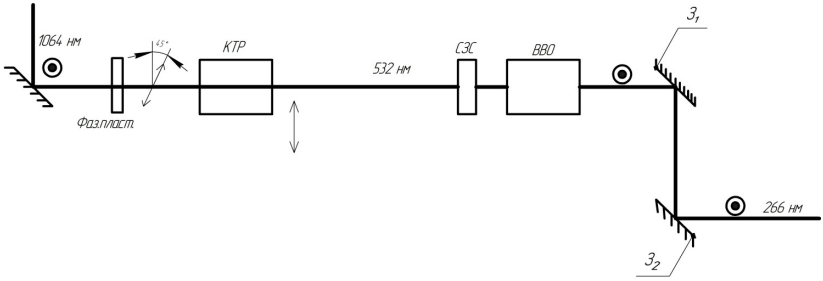


Рис. 9. Оптическая схема преобразования в четвертую гармонику (⦿ – поляризация перпендикулярная плоскости рисунка)

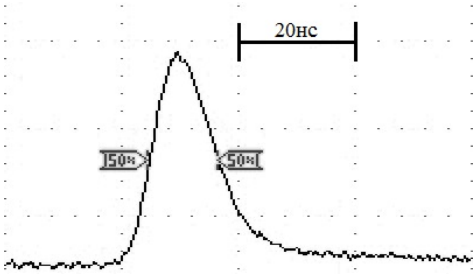


Рис. 10. Форма импульса лазерного излучения на длине волны λ_4 = 266 нм

Для повышения стабильности выходной энергии кристалл четвертой гармоники помещен в термостат (LOTIS TII), который поддерживает стабильную температуру 45 C.

Формы лазерных импульсов первой, второй, четвертой гармоник представлены на рис. 11.

Из рис. 11 наглядно видно, что нелинейно-оптические преобразование частоты приводит к укорочению длительности лазерных импульсов высших гармоник.

В таблице обобщены полученные результаты.

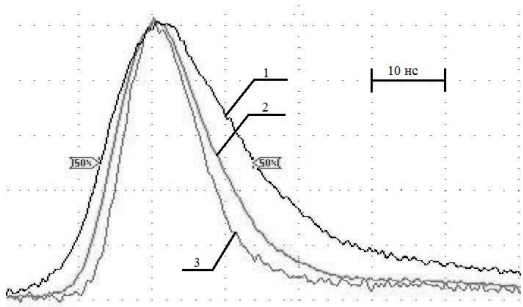


Рис. 11. Формы лазерных импульсов:
1 – первая гармоника; *2* – вторая гармоника; *3* – четверная гармоника

Характеристики световых импульсов лазерного излучения первой, второй, третьей и четвертой гармоник созданной лазерной установки

Длина волны, λ, нм	Длительность импульса, τ, нс	Время нарастания импульса, τ_R, нс	Время спада импульса, τ_F, нс	Энергия импульса, *E*, мДж	Мощность импульса, *P*, МВт
1064	22,1	11,8	50	40	1,8
532	15	7.5	20,2	15	1
355	12	7.4	21	До 1,5	0,1
266	11,8	6,5	15,7	До 1,5	0,1

Вывод

Таким образом, модернизирован YAG:Nd^{3+} лазер с пассивной модуляцией добротности и поляризационным выводом излучения, который обеспечивает генерацию близких к гауссовой форме наносекундных световых импульсов на длине волны $\lambda_1 = 1064$ нм, длительностью $\tau_1 = 22{,}1$ нс. Созданы блоки нелинейно-оптических преобразователей частоты, генерирующих излучение на длинах волн $\lambda_2 = 532$ нм, $\lambda_3 = 355$ нм, $\lambda_4 = 266$ нм. Параметры данной лазерной установки обеспечивают возможность проведения работ по исследованию генерации ориентационно-поляризационно-чувствительных фотовольтаических импульсов в пленочных наноструктурах [7, 8] в широком диапазоне длин волн.

Список литературы

1. *Михеев, Г. М.* Эффективный одночастотный ИАГ:Nd3+ – Лазер с пассивной модуляцией добротности и поляризационным выводом излучения / Г. М. Михеев, Д. И. Малеев, Т. Н. Могилева // Квантовая электроника. 1992. – 19, № 1. – С. 45–47.

2. *Егоров*, *А. С.* Твердотельные лазеры с диодной накачкой на керамике, допированной ионами Nd3+ и Yb3+. [Электронный ресурс] // Университет Лобачевского Россия. – URL: http://www.unn.ru/pages/e-library/methodmaterial/2010/131.pdf (дата обращения: 21.11.2016).

3. *Ананьев*, *Ю. А*. Оптические резонаторы и проблемы в расходимости лазерного излучения. – М. : Наука, 1979. – 327 с.

4. *Звелто*, *О*. Принципы лазеров. – М. : Мир, 1984. – 388 с.

5. *Дмитриев*, *В. Г*. Прикладная нелинейная оптика: Генераторы второй гармоники и параметрические генераторы света. – М. : Радио и связь, 1982. – 352 с.

6. *Ландсберг*, *Г. С*. Оптика. – М. : Наука, 1976. – 928 с.

7. *Михеев*, *Г. М*. Светоиндуцированная ЭДС в серебро-палладиевых резистивных пленках / Г. М. Михеев., Р. Г. Зонов., В. А. Александров // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 36, № 14. – С. 79–87.

8. *Михеев*, *Г. М*. Нанографитовый анализатор поляризации лазерного излучения / Г. М. Михеев, В. М. Стяпшин // Приборы и техника эксперимента. – 2012. – № 1. – С. 93–97.

Features of Laser Engraving Products Made of Organic Glass

The description of the YAG:Nd laser with passive Q switching for research of nonlinear optical effects in a wide spectral range is presented. At the wavelength of 1064 nm the nanosecond laser pulses with the duration of 22 ns have a smooth shape and single transverse mode. The energy of a single-frequency light pulse was 40 mJ. The nonlinear optical frequency conversion blocks of second, third and fourth harmonics for the application in a wide spectral range were created.

Keywords: single-frequency laser; polarization; nonlinear optical frequency conversion; pulse shape

УДК 681.2.083; 621.7.043; 669-1

Е. А. Печина, кандидат технических наук, доцент
Е. С. Данилова, студентка
Н. А. Орлова, кандидат физико-математических наук, доцент
E-mail: el_pechina@mail.ru
Удмуртский государственный университет, г. Ижевск

Применение метода регистрации момента кручения для изучения механосплавления в системе Cu-Zn в процессе мегапластической деформации

Представлены результаты изучения механосплавления чистых порошков Cu и Zn в смесях с различным весовым соотношением в процессе мегапластической деформации. Методами металлографии, рентгеновской дифракции и микроиндентирования обнаружено, что в процессе деформации формируются объемные нанокомпозиты с мягкой матрицей и твердыми дисперсными включениями. Установлено, что процесс механосплавления порошков чистых Cu и Zn происходит в несколько стадий: измельчение и консолидация, образование твердых растворов на основе Cu(Zn), выделение вторичных фаз различной морфологии. Показано, что применение метода регистрации момента кручения позволяет in situ определять и характеризовать стадии деформации.

Ключевые слова: механосплавление; мегапластическая деформация; объемные нанокомпозиты; кривые упрочнения; момент кручения; микроиндентирование; морфология; фазовый состав; медь, цинк

Введение

Методы мегапластической деформации (МПД) являются перспективными для создания новых материалов с уникальными свойствами благодаря образованию наноструктуры [1–6]. Изучение формирования структуры и свойств в процессе деформации позволяет получать новые знания в области физики прочности и пластичности, а также расширять и открывать новые горизонты для применения их в микроэлектромеханических системах, медицине, авиации, машиностроении и т. д. Известно [1, 2], что в процессе МПД смесей порошков из чистых компонентов возможно образование новых композиционных материалов.

Система Cu-Zn является основой для промышленных сплавов (латуней). Данные об изменении структуры и свойств сплавов на основе

© Печина Е. А., Данилова Е. С., Орлова Н. А., 2017

этой системы в процессе МПД практически отсутствуют. Ранее в работах [7, 8] исследованы композиты Cu-42 %(вес.)Zn, полученные МПД кручением из смеси чистых компонент. Обнаружено, что в результате деформации происходит образование пересыщенного α-твердого раствора, а также дисперсных ε- и γ-фаз из высококонцентрированной части равновесной диаграммы состояния. Отметим, что равновесная диаграмма состояния системы Cu-Zn имеет перитектические превращения и образует ряд различных фаз. В связи с этим исследование влияние МПД кручением на формирование структуры и свойств композитов этой системы, безусловно, вызывает интерес.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования выбраны смеси порошков чистых компонентов с различным химическим составом: Cu – x %(вес.)Zn (x = 36; 42; 56; 62; 72; 82; 92). Порошки меди и цинка приготовлены напиливанием массивных прутков из М1 и ЦВО соответственно. Смеси порошков предварительно компактировали одноосным прессованием при давлении 800 МПа. Образцы имели диаметр 8 мм. В качестве контрольных объектов таким же образом приготовлены образцы из Cu и Zn.

Кручение под давлением проводили на установке, реализованной на базе гидравлического пресса ДГ2432. Измерение *in situ* сопротивления сдвиговой деформации проводили с помощью торсионного датчика с дополнительными симметрично расположенными упругими элементами [9]. В результате деформации каждого образца получали кривую $M(n)$ (момент кручения – количество оборотов), характеризующую стадии механосплавления смесей порошков. Деформацию в наковальнях Бриджмена с сердечниками из стали ШХ15 ∅10 мм проводили при комнатной температуре под давлением 3 ГПа со скоростью вращения подвижной наковальни 1 об/мин. Число оборотов подвижной наковальни изменяли до 8.

Схема деформации при проведении этого вида МПД заключается в кручении нижней наковальни вокруг оси приложенной на верхнюю наковальню нагрузки, что создает в образце под высоким квазигидростатическим давлением сдвиговую деформацию, зависящую от радиуса. Таким образом, фронт деформационной волны в образце в процессе кручения продвигается от края к центру образца с увеличением угла закручивания. Поэтому для расчета истинной логарифмической степени деформации e использовали формулу

$$e = \ln\left(h_0/h_{iR}\right) + \ln\left(1 + \left(\left(\varphi \cdot R\right)/h_{iR}\right)^2\right)^{1/2}, \qquad (1)$$

где h_0 – исходная толщина образца; h_{iR} – толщина образца после деформации на i-м расстоянии от центра; φ – угол поворота подвижной наковальни; R – радиус рабочей площадки наковальни.

Микротвердость образцов измеряли на приборе ПМТ-3 по методу Виккерса. Измерения проводили с шагом 0,25 мм по двум взаимноперпендикулярным диаметрам образца. Металлографические исследования шлифов проведены на микроскопе Neophot 21. Рентгеноструктурный и фазовый анализ образцов в исходном и деформированном состояниях проведен с помощью съемки на установке ДРОН-6 в Co-Kα-излучении. Для качественного и количественного анализа дифрактограмм использовали специализированный пакет программ «МИСиС».

Результаты исследования и обсуждение

В результате экспериментов получены монолитные образцы, полученные механосплавлением смесей порошков. Кривые $M(n)$, полученные при кручении смесей представлены на рис. 1.

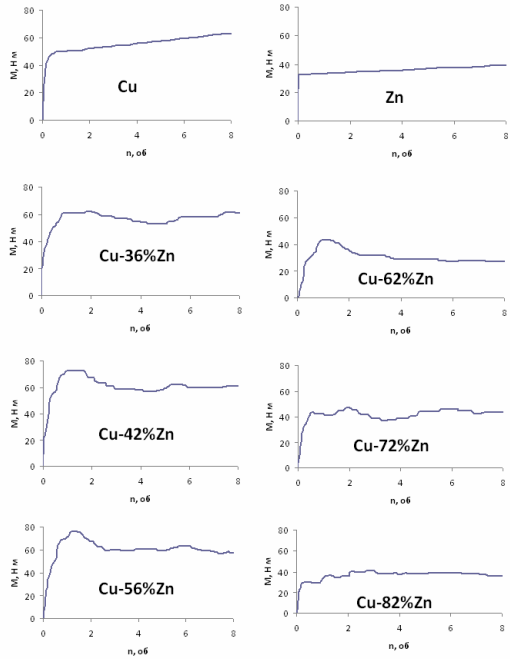


Рис. 1. Кривые момента кручения, полученные в процессе деформации смесей Cu-Zn при давлении 3 ГПа в наковальнях Бриджмена

Известно [2, 7], что по поведению кривых можно судить о закономерностях развития процессов деформаций в деформируемом образце. Кривые сопротивления деформации смесей порошков Cu и Zn показали стадийное изменение значений M с увеличением количества оборотов, по сравнению с чистыми компонентами. Для меди и цинка наблюдается поведение кривых, характерное для однофазных материалов, непретерпевающих фазовые превращения в процессе деформации. В начале эксперимента на малых углах закручивания происходит резкий рост значений M, а с дальнейшим проведением кручения – незначительное увеличение. Что соответствует стадиям измельчения и консолидации порошинок в результате механосплавления. На рис. 1 видно, что абсолютные значения M для кривой меди выше, чем для цинка, что обусловлено значениями твердости исходных компонент.

Тогда как для кривых $M(n)$ смесей порошков характерно многостадийное поведение, что указывает на отличное от чистых компонент протекание процессов при формировании композитов. Отметим, что кривая, полученная для Cu-56 %Zn, имеет максимальные абсолютные значения M, что характеризует большую степень упрочнения по сравнению с другими смесями.

Измерения микротвердости полученных деформацией с 8 оборотов показали, что образец с химическим составом Cu-56 %Zn по сравнению с другими имеет и высокую твердость (рис. 2), среднее значение которой составило около 3 ГПа, что значительно выше, чем у меди и цинка, полученных в тех же условиях.

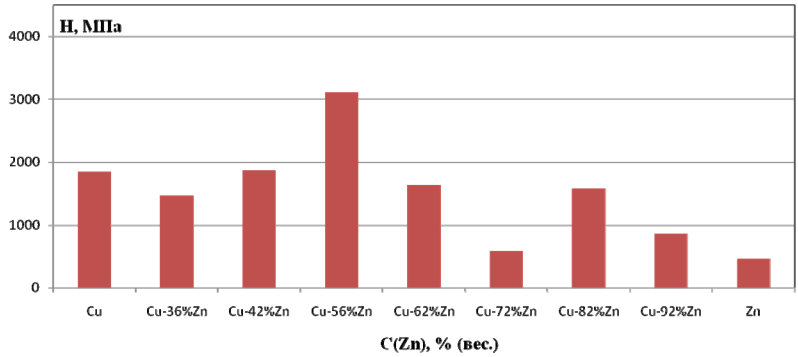


Рис. 2. Средняя микротвердость образцов после МПД при 3 ГПа с 8 оборотов

Измерения микротвердости образцов, полученных с различным количеством оборотов, показали, что для всех деформированных образцов наблюдается рост микротвердости (*H*) с увеличением степени деформации.

Например, на рис. 3 представлены значения микротвердости для образцов Cu-56%Zn после 1, 2 и 8 оборотов.

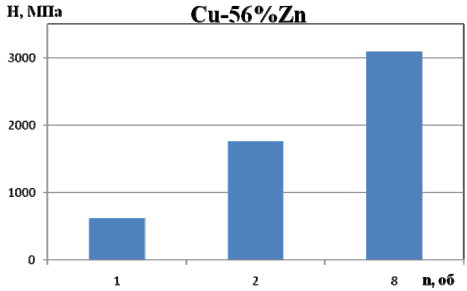


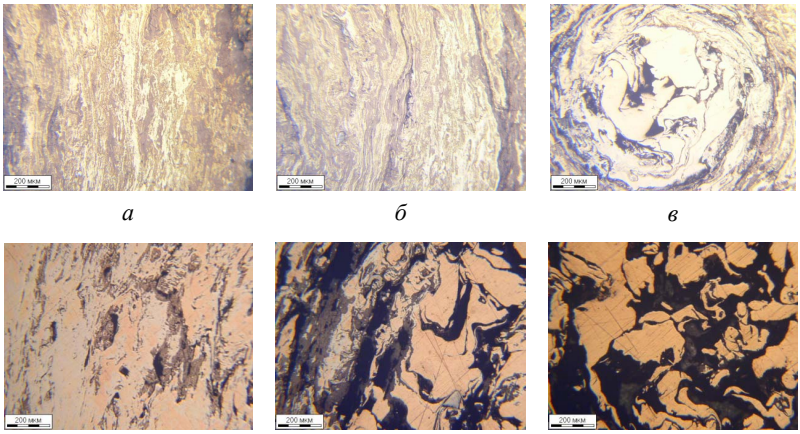
Рис. 3. Средняя микротвердость образцов после кручения при 3 ГПа после 1, 2 и 8 оборотов

Металлографические исследования образцов после 8 оборотов показали, что периферийные (рис. 4, *а*) и серединные (рис. 4, *б*) области всех образцов имеют полосовую структуру из чередующихся светлых и темных областей, тогда как центральная область (рис. 4, *в*) имеет вихревую структуру.

Формирование структуры более наглядно показывают микрофотографии образцов после одного оборота (рис. *4*, *г–е*). На периферийной области (рис. *4*, *г*) видно, что в процессе деформации происходит измельчение и интенсивное перемешивание порошинок Cu и Zn, на что указывает сформировавшаяся полосовая структура. При этом, ширина полос уменьшается при удалении от центра образца. Это обусловлено схемой деформации, при которой степень упрочнения микрообъемов образца определяется расположением от центра кручения по зависимости (1). Таким образом, более интенсивно деформационные процессы происходят на периферийных областях образцов. На центральной области наблюдается смесь деформированных порошинок Cu и Zn, претерпевших меньшую деформацию. На что указывают и диаметральные измерения микротвердости образцов.

При больших увеличениях обнаружены округлые продолговатые включения и в виде цилиндрических стержней (рис. 5). Область вокруг включений сильно искажена: полосы имеют другое от деформации

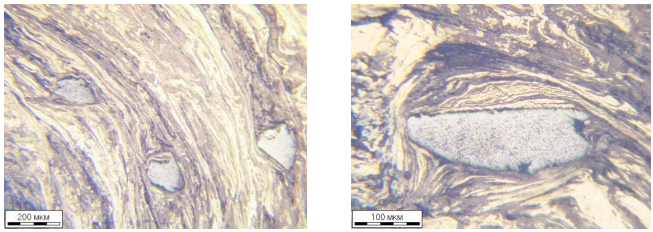
направление, в некоторых случаях – даже перпендикулярное (рис. 5, *б*). Микротвердость включений составила около 16 ГПа.



а *б* *в*

г *д* *е*

Рис. 4. Металлографические изображения структуры на периферийной (*а*, *г*), серединной (*б*, *д*) и центральной (*в*, *е*) областях образцов Cu-56%Zn после кручения при 3 ГПа с 8 оборотов (*а*–*в*) и с 1 оборотом (*г*–*е*)



а *б*

Рис. 5. Морфология включений на образце Cu-56%Zn после 8 оборотов

Обнаружено, что включения наблюдаются на всех образцах, дисперсность и количество которых зависит от процентного соотношения элементов смеси и степени деформации. Отметим, что максимальное количество включений наблюдается для образца Cu-56% после 8 оборотов.

Рентгеноструктурный и фазовый анализ композитов после 8 оборотов показал наличие следующих фаз: твердый раствор α-Cu(Zn),

ε-$CuZn_5$, γ-Cu_5Zn_8 и Zn (ГПУ). Количественный анализ дифрактограмм показал, что относительная доля вторичных фаз на фоне ГЦК и ГПУ фаз в образцах в зависимости от процентного соотношения смесей максимальная для образца Cu-56%Zn (рис. 6). Отметим, что для этого образца наблюдается также максимальное значение средней микротвердости. Известно [10], что ε- и γ-фазы очень твердые и хрупкие по сравнению с ГЦК (Cu)- и ГПУ (Zn)-фазами, поэтому образовавшиеся композиты имеют значительно высокую твердость по сравнению с образцами из чистых компонентов, полученных в тех же условиях.

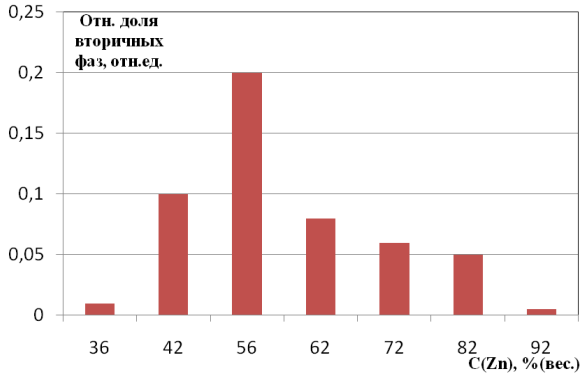


Рис. 6. Относительная доля вторичных фаз в композитах после 8 оборотов

Выводы

1. Показано, что применение метода непрерывной регистрации момента кручения в процессе деформации смесей порошков Cu-Zn позволяет установить стадии механосплавления: перемешивание и измельчение; взаимное растворение элементов с образованием твердых растворов и вторичных фаз.

2. С помощью измерения микротвердости показано, что с увеличением количества оборотов до $n = 8$ при давлении 3 ГПа в процессе ИПДК происходит сильное упрочнение образцов системы Cu-Zn. Максимальная микротвердость у образца Cu-56%Zn составила около 3 ГПа.

3. Металлографические исследования композитов Cu-x%Zn, полученных методом ИПДК при давлении 3 ГПа с количеством оборотов до 8, показали образование композитной структуры, состоящей из мягкой однородной матрицы с твердыми включениями с микротвердостью до 16 ГПа.

4. Рентгеноструктурный и фазовый анализ показал, что при ИПДК смесей чистых компонент Cu и Zn в различном соотношении образуются не только твердые растворы на основе Cu, но и вторичные фазы: ε и γ. Обнаружено, что относительная доля данных фаз коррелирует с измерениями микротвердости композитов, полученных методом ИПДК на 8 оборотов, в зависимости от химического состава.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Иванову Сергею Михайловичу за помощь в выполнении экспериментов по непрерывной регистрации момента кручения.

Список литературы

1. *Бриджмен*, *П. У.* Исследования больших пластических деформаций и разрыва: Влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов / пер.с англ. ; под ред. и с предисл. Л. Ф. Верещагина. – Изд. 2-е, испр. – М. : Либроком, 2010. – 448 с.

2. *Бланк*, *В. Д.* Фазовые превращения в твердых телах при высоком давлении / В. Д. Бланк, Э. И. Эстрин. – М. : Физматлит, 2011. – 412 с.

3. *Валиев*, *Р. З.* Объемные наноструктурные металлические материалы / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.

4. *Утяшев*, *Ф. З.* Деформационные методы получения и обработки ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов / Ф. З. Утяшев, Г. И. Рааб. – Уфа : Гилем, НИК Башк. энцикл., 2013. – 376 с.

5. *Глезер*, *А. М.* О природе сверхвысокой пластической (мегапластической) деформации // Изв. РАН. Сер. Физическая. – 2007. – Т. 71, № 21. – С. 1767–1776.

6. *Глезер*, *А. М.* Мегапластическая деформация твердых тел / А. М. Глезер, Л. С. Метлов // ФТВД. – 2008. – Т. 18, № 4. – С. 21–35.

7. *Печина*, *Е. А.* Непрерывная регистрация крутящего момента при деформации сдвигом как метод оценки эволюции структурно-фазовых превращений / Е. А. Печина, С. М. Иванов, В. И. Ладьянов, Д. И. Чуков, Г. А. Дорофеев, Е. В. Кузьминых, М. И. Мокрушина // Деформация и разрушение материалов. – 2013. – № 4. – С. 41–48.

8. *Юшкова*, *Д. Р.* Экспресс-диагностика механических свойств и структуры металлов и сплавов при деформации сдвига в наковальнях Бриджмена методом непрерывного измерения крутящего момента / Д. Р. Юшкова, Е. А. Печина, С. М. Иванов, Г. А. Дорофеев, В. И. Ладьянов // Измерения, контроль и диагностика – 2014 : сб. мат. III Всерос. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых с междунар. участием. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2014. – С. 161–168.

9. *Иванов*, *С. М.* Измерение момента кручения в процессе интенсивной пластической деформации в наковальнях Бриджмена / С. М. Иванов, Е. А. Печина, В. И. Ладьянов, Г. А. Дорофеев, В. П. Пилюгин, Е. В. Кузьминых //

Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79. – Ч. I. – № 7. – С. 49–51.

10. *Колачев, Б. А.* Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов : учеб. пособие / Б. А. Колачев, В. И. Елагин, В. А. Ливанов. – 4-е изд. – М. : МИМИМ, 2005. – 432 с.

Application of the Method of Torsional Moment Registration to Study of the Mechanical Alloying in the Cu-Zn System in the Process of Megaplastic Deformation

The results of the study of mechanical alloying pure powders of copper and zinc in mixtures with different weight ratio as a process of mega plastic deformation. Using the method of metallography, X-ray diffraction and Microindentation found that in the process of deformation formed the bulk nanocomposites with soft matrix and solids disperse of inclusions. It is found that the process of mechanical alloying powders of pure copper and of zinc occurs in several stages: crushing and consolidation, the formation of solid solutions based on Cu(Zn), the allocation of secondary phases of different morphology. It is shown that the application of the method of registration of torque allows in situ to define and characterize the stage of deformation.

Keywords: mechanical alloying; mega plastic deformation; bulk nanocomposites; hardening curves; torque; microindentation; morphology; phase composition; copper; zinc

УДК 769.02

А. В. Усольцев, студент
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Аппаратно-программный комплекс роста спортивных результатов на основе применения лазерного излучения

Разработан аппаратно-программный комплекс роста спортивных результатов на основе применения лазерного излучения, позволяющий повысить объективность и эффективность выбора восстановительных режимов лазерного излучения, моментов начала и продолжительности лазерного воздействия, когда в тканях организма спортсмена первично происходят положительные биоэнергетические, биохимические и другие физико-химические изменения. Полученные результаты могут использоваться для повышения результативности тренировочных нагрузок в атлетических видах спорта, для повышения эффективности восстановления организма после чрезмерных нагрузок при ликвидации последствий катастроф, аварий, несчастных случаев на производстве.

Ключевые слова: комплекс; спортивные результаты; бодибилдинг; квантовая терапия; тренировочные нагрузки

Непрерывный рост уровня спортивных результатов требует значительного увеличения объема и интенсивности тренировочных нагрузок. Объем тренировочных нагрузок в спорте высших достижений, особенно в бодибилдинге [1], давно близок к предельно возможному. Постоянно актуальной проблемой современного спорта высших достижений является необходимость обеспечения состояния стойкой суперкомпенсации энергоресурсов при недопустимости истощения резервов функций систем организма спортсмена и сохранении его психологического и физического здоровья. С одной стороны, в ходе тренировок обеспечивается рост тренированности спортсмена, а с другой – проводится профилактика переутомления, перенапряжения, травм и заболеваний в ходе тренировочного процесса.

Поиски новых путей повышения спортивной работоспособности, по мнению специалистов, прежде всего, обусловлены низкой эффективностью легально используемых сегодня в спорте средств и методов повышения работоспособности. Существующими способами, в том

© Усольцев А. В., 2017

числе мировыми, решения проблемы повышения спортивной работоспособности является использование исключительно фармакологических средств. Из-за низкой эффективности легально используемых сегодня в спорте средств и методов повышения работоспособности привлекает внимание использование допинговых средств, что вызывает проблемы участи спортсменов высшей категории в престижных соревнованиях. Любое новшество, ограничивающее использование фармакологических средств, исключающее использование допинга и обеспечивающее качественный рост эффективности в данном направлении, будет активно востребовано. При этом физиологически обосновывается необходимость комплексного подхода в решении данной проблемы с применением широкого спектра средств и методов клинической медицины.

В литературных источниках рассмотрены эффекты и механизмы действия низкоэнергетического лазерного излучения на организм человека, эффективность влияния низкоэнергетического лазерного излучения на показатели работоспособности спортсменов. Представлены результаты исследований по оценке влияния курсовых доз лазерной стимуляции на отдельные показатели работоспособности спортсменов. Приведены законы адаптации, в соответствии с которыми реализуются эффекты любых воздействий на организм человека. Известно, что сегодня созданы технологии комплексной подготовки квалифицированных атлетов, разработаны и производятся современные портативные лазерные терапевтические аппараты для спорта и спортивной медицины. Однако в настоящее время в отечественном спорте, в том числе спорте высоких достижений, квантовые методы лечения применяются редко, в основном не для подготовки спортсменов к соревнованиям и восстановления работоспособности после них, а для лечения травм и ряда сопутствующих заболеваний.

Для различных видов спорта, разных спортсменов характерен явный недостаток репрезентативных статистических данных о спаде спортивной работоспособности, появлении травм, предболезненных состояний и синдромов, появление которых в общем случае носит случайный характер. В реальных условиях тренировок, при наличии большого количества влияющих факторов, обычно нельзя проводить активные эксперименты, поэтому данные обычно представляют собой результаты наблюдения за происходящим процессом в течение длительного времени, которые приблизительны из-за возрастных изменений и изменений спортивного мастерства. Известны методы последовательного лазерного воздействия на сосудисто-нервные сплетения, при этом мощность, частота, начало и окончание воздействия выбира-

ются субъективно. Влияние низкоинтенсивного лазерного излучения проявляется на клеточном уровне, поэтому оперативно определить результативность его воздействия очень сложно. Необходима разработка четких, объективных, универсальных рекомендаций по моментам и времени применения лазерных методов. Поэтому актуальным является создание предпосылок планомерного роста спортивных результатов спортсмена на протяжении всей спортивной карьеры с достижением пика спортивной формы в строго установленные сроки за счет применения в качестве эффективного средства восстановления и повышения спортивной работоспособности низкоэнергетического лазерного излучения, разработки четких, объективных, универсальных рекомендаций по выбору длины волны, мощности, частоты лазерного излучения, моментам и времени применения. Разработаны конкретные рекомендации для спортсменов-бодибилдеров.

Даже при масштабном применении лазерного излучения для лечения и профилактики широкого круга заболеваний в медицинской практике отсутствуют рекомендации по его индивидуальному применению. В тоже время в медицинской литературе отмечается, что лазерная терапия до конца не разработана, имеются белые пятна, а математические расчеты дозы лазерного воздействия не всегда совпадают с клиническими эффектами. Основными показаниями в медицине для применения лазерной терапии являются болевые синдромы, нарушение микроциркуляции, нарушение иммунного статуса, аллергические проявления, заболевания воспалительного характера, необходимость стимулирования восстановительных процессов в тканях и регуляторных механизмов организма.

Для реализации лазерной терапии выпускаются два типа низкоэнергетических лазеров: газовые гелий-неоновые и твердотельные полупроводниковые. Наиболее популярны полупроводниковые лазеры, работающие в инфракрасном спектре, используемые как для воздействия на зоны, так и для рефлексотерапии и внутрисосудистого воздействия на кровь.

Эффективность лазерного воздействия зависят от дозы, которая выражается в джоулях. Более точным физическим критерием дозы является плотность дозы или энергетическая облученность на поверхности ткани.

Время воздействия лазерного излучения на организм спортсмена для восстановления и повышения спортивной работоспособности имеет значение, однако научных рекомендаций по его заданию нет. Отсутствует методика расчета появления рецидивов во время реабилитации.

Для оценки ожидаемой продолжительности периодов наибольшей спортивной активности спортсмена и спада спортивной работоспособности использованы следующие подходы:

– статистический подход, заключающийся в максимально полном использовании статистики личных наблюдений, а также данных других спортсменов;

– графоаналитический подход, заключающийся в использовании логических методов анализа «деревьев событий» или расчетных, имитационных, моделей пользователей;

– экспертный подход, заключающийся в выработке оценки путем учета мнений специалистов в данной области.

Для различных источников характерен явный недостаток репрезентативных статистических данных о процессе подготовки к соревнованиям, уникальности, отсутствии исчерпывающих исходных данных о биофизиопсихологических параметрах каждого спортсмена, условиях проведения и промежуточных результатах тренировки. Поэтому целесообразно применение сочетания указанных подходов и процедур, адаптированных к специфике целей и задач подготовки к соревнованиям конкретного спортсмена.

На основании вышеизложенного разработан аппаратно-программный комплекс роста спортивных результатов на основе применения лазерного излучения за счет изменения спортивной активности спортсмена. Использование медицинских рекомендаций, приведенных в специальной литературе, результатов исследований по оценке влияния курсовых доз лазерной стимуляции на показатели работоспособности спортсменов, математического аппарата теории вероятностей, массового обслуживания, случайных потоков позволяет оптимизировать вероятностно-временные характеристики периодичности спортивной активности спортсмена. Полученные аналитические выражения не противоречат результатам математического моделирования и результатам опытного применения. Согласованность теоретического и статистического распределений проверена с использованием критерия согласия, критерия χ^2 Пирсона.

Разработанный аппаратно-программный комплекс позволит повысить объективность и эффективность выбора восстановительных режимов лазерного излучения, моментов начала и продолжительности лазерного воздействия, когда в тканях организма спортсмена первично происходят положительные биоэнергетические, биохимические и другие физико-химические изменения. Полученные результаты обеспечат планируемый рост спортивных результатов, могут использоваться для повышения результативности тренировочных нагрузок в атлетических

видах спорта, для повышения эффективности восстановления организма после чрезмерных нагрузок при ликвидации последствий катастроф, аварий, несчастных случаев.

Список литературы

1. *Бельский*, *И. В*. Системы эффективной тренировки: Армрестлинг. Бодибилдинг. Бенчпресс. Пауэрлифтинг. – Смоленск : Вида-Н, 2002. – 352 с

2. *Валеев*, *Н. М*. Дифференцирование методики восстановления работоспособности травмированных легкоатлетов на этапе спортивной реабилитации / Н. М. Валеев, Н. В. Швыгина // Теория и практика физической культуры. – 2007. – № 1. – С. 49–54.

3. Методы быстрого восстановления спортсмена между стартами в день соревнований / Е. Я. Гаткин [и др.] // Медицина для спорта – 2011 : материалы I Всерос. конгр. с междунар. участием. – Москва, 19–20 сентября 2011. – М., 2011. – С. 127–129.

4. *Павлов*, *С. Е.* Современные принципы медико-биологического обеспечения подготовки высококвалифицированных атлетов / С. Е. Павлов, Т. Н. Павлова // Актуальные проблемы организации подготовки и участия спортсменов спортивных сборных команд России в Играх XXXI Олимпиады 2016 года в Рио-де-Жанейро (Бразилия) : материалы Всерос. науч.-практ. конф. – М. : ФНЦ ВНИИФК, 2013. – С. 54–59

5. *Потемкин*, *Л. А*. Медико-биологическое обеспечение и квантовая медицина спорта высших достижений. – М., 2001. – 135 с.

6. *Москвин*, *С. В*. Эффективность лазерной терапии. – Т. 2. – М. ; Тверь : Триада, 2014. – 896 с. – (Эффективная лазерная терапия).

7. *Усольцев*, *А. В*. Оптимизация финансовых затрат на тренировочный процесс при подготовке спортсмена к соревнованиям / Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. асп., магистр. и молодых ученых с междунар. участием (20–21 апр. 2016 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. – С. 507–511.

8. *Усольцев*, *А. В*. Система контроля усталости спортсмена в процессе тренировки / Новые направления развития приборостроения : материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов (20−22 апр. 2016 г. Минск, Республика Беларусь). – Минск : Бел. нац. техн. ун-т, 2016. – С. 158.

The Hardware and Software of Sporting Results Growth on the Basis of Application of the Laser Radiation

The hardware and software of growth of sports results on the basis of use of laser radiation allowing to increase objectivity and efficiency of the choice of the recovery modes of laser radiation, the moments of the beginning and duration of laser impact when in body tissues of the athlete initially there are positive bioenergy,

biochemical and other physical and chemical changes is developed. The received results can be used for increase in effectiveness of training loads in athletic sports, for increase in efficiency of recovery of an organism after excessive loadings in case of mitigation of consequences of catastrophic crashes, accidents, occupational accidents.

Keywords: complex; sports results; bodybuilding; quantum therapy; training loads

УДК 535.14

В. П. Усольцев, кандидат технических наук, ведущий инженер
О. И. Уразманова, студентка
E-mail: vpusoltcev@mail.ru, urazmanova94@mail.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Расширение функциональных возможностей систем анализа изменения оптической неоднородности жидких сред

На основании патентных исследований, изучения научно-технической литературы проведен аналитический обзор методов анализа неоднородностей жидких сред. Рассмотрены преимущества фотометрического способа, основанного на измерении пропускания, поглощения или рассеяния света анализируемой средой в области ультрафиолетовых, видимых и инфракрасных волн. Проведен анализ существующих систем, предложены способы расширения функциональных возможностей систем анализа изменения оптической неоднородности жидких сред.

Ключевые слова: фотометрия; длина волны; спектр; фотоизлучатель; жидкая среда

Для того чтобы поддерживать экологическую среду в норме, технический прогресс не должен стоять на месте. Человеку необходимо постоянно развиваться в области науки и техники. Для более глобального представления проблемы сточных вод, загрязняющих водоемы и почву, необходимо уделить большое внимание микроэлементам, содержащимся в воде.

На основании патентных исследований, изучения научно-технической литературы проведен аналитический обзор методов анализа неоднородных жидких сред. В литературе представлены различные методы анализа неоднородных жидких сред. Одним из самых распространенных методов физико-химического анализа является фотометрический. Он относительно прост, обладает высокой чувствительностью и возможностью применения для определения почти всех элементов периодической таблицы Менделеева, а также большого количества органических веществ. Есть необходимость применения его для нахождения микропримесей в объектах исследования. Преимущество данного метода в том, что он дает возможность установить

© Усольцев В. П., Уразманова О. И., 2017

концентрацию вещества в растворе в тех случаях, когда вещество приобретает окраску путем воздействия на него химического реагента. С помощью фотометрического анализа определяют поток света с узкой областью спектра после прохождения его через слой окрашенного раствора [1].

Выделяют три основных метода: колориметрия, фотоэлектроколориметрия и спектрофотометрия. В исследуемом приборе применяется метод фотоэлектричесой колометрии. В нем за счет фотоэлементов, заменяющих глаз человека, есть возможность избежать ошибки субъективной оценки при исследовании. Принцип в том, что фотоэлементы под действием света дают электрический ток. Если между источником света и фотоэлементом поместить светопоглащающую среду, то сила фототока уменьшится в зависимости от интенсивности окраски раствора [2]. Далее составляется график зависимости между интенсивностью фототока и концентрацией вещества в растворе.

Проведя исследование функциональных возможностей прибора, принцип работы которого основан на фотометрическом методе, мы можем улучшить его характеристики за счет многоканальности, т. е. поставить несколько видов фотоизлучателей, которые работают на разных частотах. На данный момент установка не имеет возможности определять несколько видов загрязнения одновременно. Так, например, с помощью данной установки можно определить содержание в воде масла, которое имеет длину пропускания света около 400 нм и нефтепродуктов (длина волны 350 нм), что ответствует УФ-излучению оптического спектра [3].

Выбор спектрального метода для исследования определяется наличием тех или иных структурных особенностей вещества. В ИК-области проявляются переходы между колебательными и вращательными уровнями. Колебательные спектры чувствительны к изменению состава, температуры вещества, агрегатному состоянию. ИК-область хорошо распознает изменение органических веществ, таких как водород, кислород, азот, сера, фосфор, свинец, ртуть. Поэтому имеет смысл использовать не только УФ-спектры, но и ИК-спектры для качественного анализа [4].

Благодаря добавленным функциональным возможностям увеличивается пропускная способность и точность исследования. Появится возможность применять данную установку во многих отраслях промышленности, где промышленные стоки загрязнены вредными и отравляющими веществами. К тому же доработка позволит облегчить определение состава и структуры жидкой среды.

Список литературы

1. *Якушенков*, *Ю. Г.* Оптические и оптико-электронные системы. Оптические технологии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 3(79). – С. 1–3.

2. *Тарасов*, *В. В.* Инфракрасные системы «смотрящего» типа / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенков. – М. : Логос, 2004. – 444 с.

3. *Смит*, *А. Л.* Прикладная ИК-спектроскопия. – М. : Мир, 1982. – 328 с.

4. Инфракрасная спектроскопия (ИК-спектроскопия) // Bourabai Research. – URL: http://bourabai.ru/physics/1410.html (дата обращения: 09.12.2016).

Functionality Enhancement of Systems for Analysis of Changes in the Optical Inhomogeneity of Liquid Media

Based on patent research, the study of scientific - technical literature conducted an analytical review of methods for the analysis of inhomogeneous liquid media. The advantages of the photometric method based on the measurement of transmission, absorbance or light scattering medium to be analyzed in the ultraviolet, visible and infrared wavelengths. Offered methods of extending the functionality of systems of analysis of changes in the optical inhomogeneity of liquid media.

Keywords: photometry; laser emission wavelength; absorbance spectrum; photoemitter; liquid media

УДК 681.2

А. В. Усольцева, соискатель
E-mail: ajieksa_oo@mail.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Виртуальная система лазерной обработки анизотропных материалов

Разработана виртуальная система лазерной обработки анизотропных материалов, позволяющая достигнуть заданного состояния поверхности материалов с учетом существования функционально-корреляционных связей между параметрами, характеризующими технологию лазерной обработки, свойства анизотропных материалов в плоскости обработки и состояние поверхности.

Ключевые слова: виртуальная система; лазерная обработка; анизотропные материалы; функционально-корреляционные связи

Трудно переоценить роль лазера в нашей жизни. На практике насчитывается более десятка сотен областей использования лазеров, от медицины до космических полетов и термоядерного синтеза. Наиболее массовой областью использования лазерной техники является лазерная обработка материалов, в которой в большинстве случаев используется тепловое воздействие лазерного излучения. Исключительно широкое использование лазеров объясняется их уникальными свойствами [1, 2]. Применение лазеров основано на использовании широкого круга явлений, связанных с разнообразными проявлениями взаимодействия света с материалами. Некоторые материалы обладают различными свойствами в различных направлениях. Их называют анизотропными. Анизотропными могут быть твердые материалы по причинам упорядоченного расположение частиц в виде решетки или из-за слоистой структуры. Некоторые прозрачные аморфные материалы (стекло, целлулоид, пластмассы из эпоксидных смол, фенолформальдегидные пластмассы и др.) способны изменять свои оптические свойства при упругом деформировании. Под нагрузкой эти материалы становятся оптически анизотропными.

Состояние поверхности при лазерной обработке таких материалов определяется основные характеристики лазерного воздействия и свойствами материала в направлении воздействия.

© Усольцева А. В., 2017

Постоянно возрастающие объемы лазерных технологий, увеличивающееся количество видов анизотропных материалов существенно осложняют решение вопросов получения поверхностей с заданными свойствами, автоматизации управления технологическими процессами. Вопросы совершенствования структуры системы управления автоматизированными технологическими процессами лазерной обработки материалов требуют дальнейшего изучения и обобщения. Первостепенное значение имеет разработка теоретических и методических основ технологического использования лазеров для обработки материалов с учетом состояния поверхности при лазерного гравировании и маркировании [3].

Существование корреляционных связей между параметрами лазерного излучения и другими параметрами, характеризующими технологию лазерной обработки, является предпосылкой получения поверхности материала с заданными характеристиками. Предлагаемый подход достаточно перспективен, т. к. в этом случае состояние поверхности будет функционально связано с параметрами лазерной обработки и свойствами анизотропных материалов в плоскости обработки.

Для проблемно-ориентированного автоматизированного управления параметрами поверхности система физических процессов при лазерной обработке представлена в виде системы внутренних моделей из последовательной цепи модельных блоков, предназначенных соответственно для идентификации вида анизотропного материала, его свойствами в плоскости обработки, длины волны, мощности лазерного излучения, скорости движения лазерного луча., разрешающей способности, частоты импульсов, диаметра сфокусированного лазерного излучения на материале, угла падения лазерного луча. Каждый блок снабжается моделью (информационным процессором), входными данными и возможностями адекватного представления результатов на выходе. Входными данными каждого модельного блока могут служить: либо измерительные и статистические данные (из баз данных и знаний, экспертных систем), либо результаты модельных расчетов, поступающие с выхода предыдущего блока, либо те и другие одновременно, причем с весовыми вкладами, учитывающими уровень неопределенности в каждом из них. Внутренняя модель организована иерархически и содержит несколько уровней пространственной, временной организации, специализированных, соответствующих конкретному материалу, или универсальных, охватывающих все возможные случаи практической реализации. Параллельно предусмотрено несколько уровней иерархии параметров модели, отвечающих разной степени детальности модельного представления процессов, например, может

детализироваться как модель реакции определенной аппаратуры управления на изменение свойств материала. Если модель функционирует правильно, то чем выше уровень, тем более надежная информация в нем накапливается. В модели постоянно будет происходить фоновый процесс, отвечающий за согласование разных уровней представления информации.

На основании разработанных моделей с учетом ранее приведенных исходных данных сформированы требования к аппаратуре адаптивного контроля, выделены информативные параметры, заданы начальные условия, диапазон изменения рабочих характеристик, установлены научно обоснованные требования к конструкторско-технологическим решениям, контрольно-измерительной аппаратуре, лазерной установке, определен алгоритм работы, разработаны структурная, функциональная и принципиальная схемы системы.

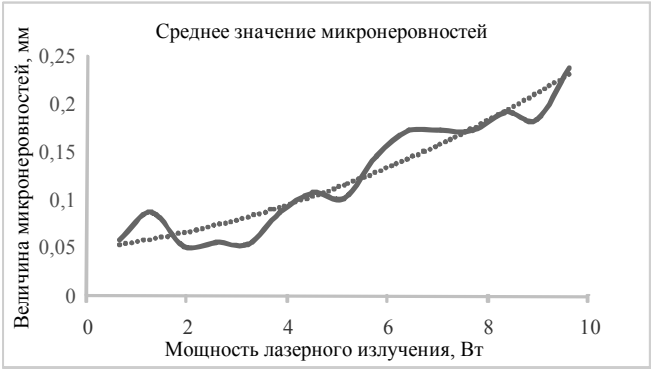
Для оперативного управления технологическими процессами, получения точных исходных данных, проверки адекватности математической модели разработана система управления лазерным технологическим процессом обработки материалов в реальном масштабе времени [4].

Функционирование системы управления лазерным технологическим процессом обработки анизотропных материалов осуществляется следующим образом. На начальном этапе формируется архив на основании базы данных изменения состояния поверхности материалов при лазерной обработке, функционально-корреляционных связях между характеристиками поверхности и параметрами лазерного излучения. Далее, на основании полученных статистических материалов, задаются режимы лазерной обработки, контролируются характеристики поверхности, при отклонении результатов от заданных производится коррекция.

С учетом микроструктуры, химического состава и направлений изменения физико-механических характеристик используемых материалов для проведения исследований выбрана лазерная установка на углекислом газе CO_2. Анализ изменений состояния поверхности проводился при изменении мощности лазерного излучения от 2 до 12 Вт, скорости движения лазерного луча от 10 до 180 см/сек., разрешающей способности, количества линий на дюйм от 100 до 1000 dpi., частоты импульсов излучения от 500 до 1000 Гц, диаметра сфокусированного лазерного луча на материале от 0,05 до 1,0 мм угла падения лазерного луча от 0 до 45° и комбинации этих режимов [5].

Величина микронеровностей при изменении мощности излучения лазера, остальных постоянных параметрах (скорости движения лазер-

ного луча 18 см/сек., разрешающей способности 500 dpi, частоте импульсов 1000 Гц, диаметре сфокусированного лазерного луча на материале 0,1 мм, угле падения лазерного луча 0°) для анизотропных материалов с плоскостью обработки параллельной слоистой структуре представлена на рис. 1. Точечной кривой изображена аппроксимация функциональной зависимости полиномиальной функцией.



Микронеровности при лазерной обработке анизотропного материала с плоскостью обработки параллельной слоистой структуре

По результатам статистической обработки результатов (расчете дисперсии, коэффициента корреляции, *t*-критерия Стьюдента) даны рекомендации по заданию режимов режимы работы лазерной установки, обеспечивающие заданное состояние поверхности при лазерной абляции материалов.

Из графика видно, что до определенного нарастания мощности величина микронеровностей увеличивается (рисунок). Это свидетельствует, что высота и характер рельефа, как физические величины, характеризуют скорость изменения температуры нагрева материала при неравновесных тепловых процессах, позволяют комплексно учесть нелинейное изменение термических параметров материалов, вызванных изменением физических, механических, химических, эстетических свойств из-за неоднородности микроструктуры, вызванной объемной неопределенностью и многовариантностью реализаций характеристик используемого материала.

Таким образом, практика лазерной обработки анизотропных материалов подтверждает огромные возможности лазерных технологических процессов, которые позволяют эффективно решать крупные про-

изводственные задачи. При этом применение лазерной техники выводит производство на новый высокоинтеллектуальный уровень. Проведенные исследования позволяют повысить эффективность применения лазерной техники при создании новых технологий.

Проведенные исследования показали, что для достижения заданного состояния поверхности анизотропных материалов при разработке основ технологического использования лазеров для обработки с помощью разработанных теоретических и методических основ перспективно использование виртуальной системы, учитывающей существование функционально-корреляционных связей между параметрами, характеризующими технологию лазерной обработки, свойствами анизотропных материалов в плоскости обработки и состояние поверхности.

Список литературы

1. *Emmelmann*, *C*. Introduction to Industrial // Laser Materials Processing, Rofin-Sinar. – Hamburg, 1998. – P. 180.

2. Laser materials processing: User's Handbook Manual. / Sc. Edit. Panchenko V. Ya. // Bulgaria, Plovdiv, 2001.

3. *Полушкин*, *С. А*. Эффективное управление комплексом лазерной гравировки. Ч. 2 // Фотоника. – 2011. – № 3(27). – С. 38–43.

4. *Черных*, *М. М.* Методика определения режимов работы лазерной установки при гравировании изделий из кожи / М. М. Черных, А. В. Усольцева, В. П. Усольцев // Технология художественной обработки материалов : сб. науч. тр. XVII Всерос. науч.-практ. конф. – Иркутск : ИрГТУ, 2015. – С. 400–407.

5. *Usoltseva*, *A. V*. The laser engraving in decorative processing of organic glass // Instrumentation Engineering in the XXI Century. Integration of Science, Education and Production : Instrumentation engineering, electronics and telecommunications – 2015 : Paper book of the I International Forum IEET – 2015 held within the framework of the XI International Scientific-Technical Conference. (November, 25–27, 2015, Izhevsk, Russia). – Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2016. – 190–194 p.

Virtual System for Laser Processing of Anisotropic Materials

The virtual system of laser processing of anisotropic materials allowing to reach the set condition of a surface of materials taking into account existence of functional and correlation communications between the parameters characterizing technology of laser processing, property of anisotropic materials in the planes of processing and a condition of a surface is developed.

Keywords: virtual system; laser processing; anisotropic materials; functional and correlation communications

УДК 535.015, 535.016

Э. М. Хуснутдинов, магистрант
Институт механики УрО РАН, г. Ижевск
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
Р. Ю. Кривенков, аспирант
К. Г. Михеев, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник
Д. Л. Булатов, кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Г. М. Михеев, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник
E-mail: emik999@yandex.ru
Институт механики УрО РАН, г. Ижевск

Устройство для исследования нелинейно-оптических свойств суспензий наноматериалов при повышенных температурах

Разработано и создано устройство для исследования нелинейно-оптических свойств суспензий наноматериалов при повышенных температурах методом z-сканирования. Устройство позволяет нагревать суспензию до 100 ºС и поддерживать заданную температуру. Описана схема z-сканирования с использованием разработанного устройства. Работоспособность устройства показана на примере исследования суспензии детонационных наноалмазов и раствора фталоционина цинка.

Ключевые слова: нелинейно-оптические свойства; оптическое ограничение мощности; *z*-сканирование; лазерное излучение; повышенная температура

Введение

При взаимодействии мощного лазерного излучения с веществом могут проявляться нелинейно-оптические процессы, такие как нелинейное рассеяние, нелинейная рефракция и нелинейное поглощение, в результате чего вещество проявляет свойство оптического ограничения мощности (ООМ). Оптическое ограничение мощности является нелинейно-оптическим эффектом, при котором коэффициент пропускания среды уменьшается при увеличении интенсивности падающего излучения. Исследование ООМ представляет интерес с точки зрения создания приборов и устройств с целью защиты светочувствительных объектов от воздействия мощного лазерного излучения [1]. Основным методом исследования ООМ в различных материалах является метод *z*-сканирования. Он заключается в измерении коэффициента оптиче-

© Хуснутдинов Э. М., Кривенков Р. Ю., Михеев К. Г., Булатов Д. Л., Михеев Г. М., 2017
Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16–38–00553).

ского пропускания исследуемого образца при его сканировании вдоль оси сфокусированного пучка лазера. Этот метод известен давно и в настоящее время широко используется для исследования ООМ в суспензиях различных наночастиц. Техника *z*-сканирования позволяет получать информацию о зависимости коэффициента нелинейного пропускания от координаты *z*, следовательно, и от плотности мощности лазерного излучения. Обычно для получения информации о коэффициенте нелинейного пропускания используют схему с открытой апертурой [2]. Для исследования нелинейной рефракции необходимо дополнительно применять схему *z*-сканирования с закрытой апертурой.

В настоящее время существует не так много работ по исследованию ООМ при повышенных температурах окружающей среды [3, 4]. При изменении температуры, как правило, меняются свойства среды, в которой суспендированы наночастицы, такие как вязкость, поверхностное натяжение или даже агрегатное состояние. Эти изменения могут существенно влиять на нелийно-оптические свойства суспензии, а значит и на ООМ. Поэтому целью данной работы является разработка и создание устройства, позволяющего исследовать ООМ в различных суспензиях методом *z*-сканирования при повышенной температуре.

Описание работы устройства и схемы *z*-сканирования при повышенных температурах

Схема устройства, позволяющего исследовать ООМ в различных суспензиях методом z-сканирования при повышенной температуре, представлена на рис. 1.

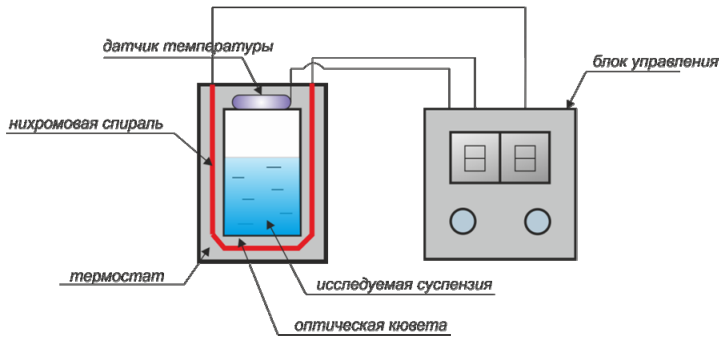


Рис. 1. Схема устройства для *z*-сканирования при повышенных температурах

Нагрев образца происходит за счет нагрева алюминиевого термостата, внутри которого установлена стеклянная оптическая кювета

с исследуемой суспензией. Размеры кюветы составляют 23×40×7 мм^3. На передней и задней стенках корпуса термостата имеются отверстия, размеры которых позволяют лазерному излучению проходить через исследуемую суспензию и попадать на фотоприемник. По периметру корпуса вмонтирована нихромовая спираль в стеклянной теплоизолирующей оболочке. На концы спирали через термостат подается напряжение U = 1–30 В, в результате чего она нагревается, передавая тепловую энергию корпусу и кювете с исследуемой суспензией. Температура измеряется специальным щупом – датчиком, подключенным к блоку управления и находящимся непосредственно над кюветой, но не соприкасающимся с корпусом термостата. Максимальная температура, которая может быть задана, составляет 100 ºС. При достижении заданной температуры блок управления автоматически отключает напряжение. При охлаждении кюветы блок управления автоматически устанавливает исходное напряжение. Таким образом обеспечивается постоянная температура суспензии с погрешностью ±1 ºС.

Геометрические размеры корпуса устройства позволяют установить его на координатный столик для z-сканирования. Схема эксперимента по z-сканированию при повышенных температурах в упрощенном виде представлена на рис. 2. Стоит отметить, что такая схема практически ничем не отличается от обычной схемы z-сканирования.

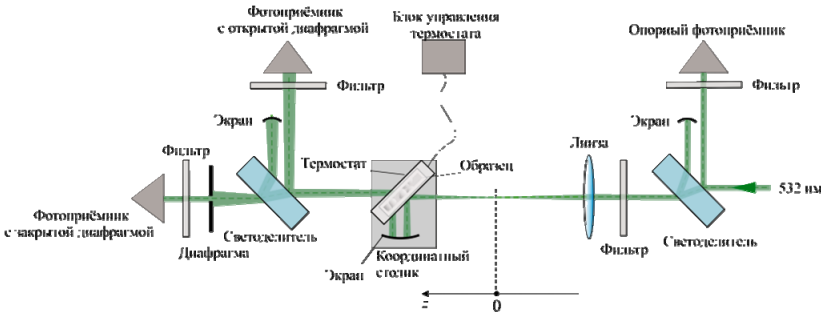


Рис. 2. Схема z-сканирования при повышенных температурах

В качестве одночастотного источника лазерного излучения используется YAG:Nd^{3+}-лазер с резонатором, построенным по оптической схеме, описанной в [5]. Оптическая длина резонатора составляет около 1100 мм. Лазер работает в одномодовом и одночастотном режиме и обеспечивает генерацию гладких лазерных на длине волны 1064 нм. Длительность импульсов составляет 21,2 нс, а диаметр лазерного пуч-

ка - 1,7 мм. Параметр M^2, характеризующий качество лазерного пучка, измеренный с помощью фокусирующей линзы с фокусным расстоянием 0,192 м и профилометра лазерного пучка BC 106–VIS (*ThorLabs*), составил 1,03. В экспериментах лазерный пучок после прохождения через инфракрасный фильтр с помощью поворотного зеркала направляется на преобразователь во вторую гармонику, состоящий из полуволновой пластины, нелинейно-оптического кристалла и фильтра, поглощающего излучение на основной частоте. Длительность лазерного импульса на длине волны 532 нм, измеренная (по уровню 0,5 от максимального значения интенсивности) с помощью фотоприемника SIR–5 (*ThorLabs*) с быстродействием около 60 пс и широкополосного цифрового осциллографа TDS7704B (*TEKTRONIX*) с полосой пропускания 7 ГГц, составляет 13,6 нс. Диаметр лазерного пучка на длине волны 532 нм, измеренный по уровню $1/e^2$ от максимальной интенсивности, составляет 1,3 мм. Далее излучение второй гармоники лазера направляется на оптическую делительную пластину, установленную под углом падения 45º. Толщина пластины подбирается такой, чтобы лучи лазера, отраженные от ее лицевой и тыльной сторон, были разделены в пространстве. Эта мера предотвращает интерференцию отраженных пучков и обеспечивает постоянство коэффициента отражения от указанных поверхностей при скачкообразном изменении продольной моды резонатора лазера. Луч, отраженный от лицевой поверхности пластины, после ослабления с помощью нейтрального фильтра направляется на опорный фотоприемник, обеспечивающий измерение энергии E_{in} падающих лазерных импульсов. Калибровка фотоприемника осуществляется с помощью пироэлектрического измерителя энергии ES111 через интерфейс PM100USB (*ThorLabs*). Луч, отраженный от тыльной стороны пластины, поглощается экраном. Для проведения экспериментов по *z*-сканированию пучок лазера после ослабления с помощью нейтральных фильтров фокусируется линзой с фокусным расстоянием 0,192 м и направляется на плоскопараллельную оптическую кювету с исследуемой суспензией, установленную на платформу однокоординатного столика LTS 150/M (*ThorLabs*) с минимальным шагом позиционирования 25 мкм. Ось движения платформы настраивается параллельно оптической оси пучка лазера. Толщина слоя суспензии составляет 1,055 мм, а толщина стенок – по 3 мм. Таким образом, полная толщина кюветы составляет около 7 мм. Оптическая кювета, помещенная в устройство для нагревания, описанное выше, устанавливается наклонно к падающему пучку под углом 45º. При этом лучи лазера, отраженные от лицевой и тыльной сторон кюветы не пересекаются в пространстве, следовательно, не происходит их интер-

ференция [6]. Эти лучи поглощаются экраном, установленным на платформе. Отсутствие интерференции обеспечивает постоянство коэффициентов отражения от внешних поверхностей оптической кюветы независимо от положения кюветы на оси z и скачкообразного изменения продольной моды резонатора лазера. После прохождения оптической кюветы часть излучения лазера за счет отражения от лицевой поверхности толстой оптической пластины отводится на фотоприемник, который служит для определения нелинейного коэффициента оптического пропускания T_{oa} в режиме с открытой апертурой по формуле $T_{oa} = E_{out.oa}/E_{in}$, где $E_{out.oa}$ – энергия импульса лазера, измеряемая фотоприtмником с открытой апертурой.

Исследование оптического ограничения мощности суспензии детонационных наноалмазов в масле при повышенных температурах с помощью созданного устройства

Для проверки работоспособности созданного устройства были проведены исследования оптического ограничения мощности в суспензии детонационных наноалмазов (ДНА) в моторном масле и растворе красителя фталоцианина цинка в диметилсульфоксиде (ДМСО) с концентрацией 47,6 мкг/мл. В экспериментах использовались ДНА, полученные по известной технологии [7], со средним размером кластеров наночастиц 50 нм. Более подробное описание свойств частиц наноалмазов приведено в [8].

Для исследования зависимости оптического ограничения мощности в указанных суспензиях образец нагревался с помощью устройства до определtнной температуры, после чего она оставалась постоянной. Затем проводилось z-сканирование по описанной выше схеме. Лазерный луч фокусировался с помощью линзы с фокусным расстоянием 0,15 м (длина перетяжки пучка z_0 при этом составляла 6,9 мм). Энергия лазерного излучения составляла 88 мкДж.

На рис. 3 представлены результаты z-сканирования суспензии ДНА в масле при температурах 20 и 100 ºС на длине волны 532 нм. Необходимо отметить, что суспензия оставалась стабильной при нагреве до 100 ºС в течение продолжительного периода времени. Видно, что при температурах 20 и 100 ºС оптическое ограничение мощности в исследуемой суспензии проявляется практически одинаково. Такие же результаты были получены и для промежуточных значений температур: при 50 и 75 ºС. Независимость оптического ограничения мощности от температуры в суспензии ДНА в масле может быть использована для изучения механизма ООМ в этих суспензиях.

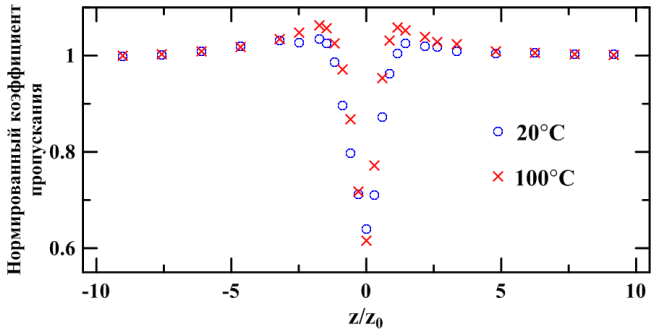


Рис. 3. Зависимости нормированного коэффициента пропускания суспензии ДНА в масле от параметра z/z_0 при разных температурах

Результаты *z*-сканирования раствора фталоцианина цинка в ДМСО, полученные при температурах 20 и 100 °С, показаны на рис. 4. Видно, что при повышенной температуре 100 °С глубина провала в зависимости нелинейного пропускания в точке $z/z_0 = 0$ заметно больше, чем при температуре 20 °С. Это означает, что ООМ в растворе фталоцианина цинка в ДМСО проявляется сильнее при повышенной температуре. Выяснение природы этого явления требует проведения дальнейших экспериментов.

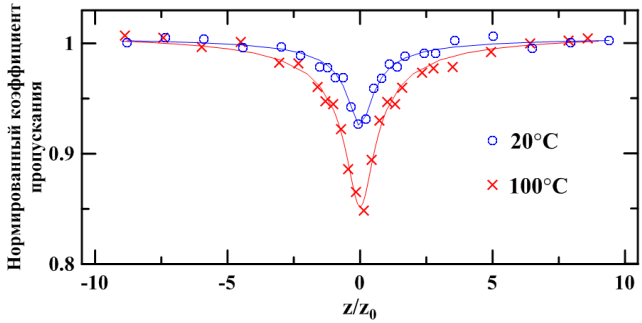


Рис. 4. Зависимости нормированного коэффициента пропускания раствора фталоцианина цинка в ДМСО от параметра z/z_0 при разных температурах

Выводы

Таким образом, с помощью разработанного устройства возможно проведение исследований нелинейно-оптических свойств суспензий различных наноматериалов методом *z*-сканирования при повышенных температурах. Благодаря таким исследованиям, можно получить более

глубокие знания о природе нелинейно-оптических эффектов, например, оптического ограничения мощности, в исследуемых суспензиях. Кроме этого, исследования могут быть полезны с точки зрения разработки и создания оптического ограничителя мощности, способного работать в широком диапазоне температур.

Список литературы

1. *Vivien*, *L.* Carbon nanotubes for optical limiting / L. Vivien, P. Lançon, D. Riehl, F. Hache, E. Anglaret // Carbon. – 2002. – V. 40. – № 10. – P. 1789–1797.

2. *Sheik-Bahae*, *M.* Sensitive measurements of optical nonlinearities using a single beam / M. Sheik–Bahae, A. A. Said, T. H. Wei, J. D. Hugan, E. W. Van Stryland // IEEE J. Quantum Electron. – 1990. – V. 26. – № 4. – P. 760–769.

3. *Wang*, *J.* The importance of solvent properties for optical limiting of carbon nanotube dispersions / J. Wang, D. Früchtl, W. J. Blau, D. Früchtl // Opt. Commun. – 2010. – V. 283. – № 3. – P. 464–468.

4. *Wang*, *J.* Control of optical limiting of carbon nanotube dispersions by changing solvent parameters / J. Wang, D. Früchtl, Z. Sun, W. J. Blau, Z. Sun, N. Johnathan // J. Phys. Chem. C. – 2010. – V. 114. – № 13. – P. 6148–6156.

5. *Михеев*, *Г. М.* Эффективный одночастотный ИАГ:Nd^{3+}-лазер с пассивной модуляцией добротности и поляризационным выводом излучения / Г. М. Михеев, Д. И. Малеев, Т. Н. Могилева // Квантовая электроника. – 1992 – Т. 19. – № 1. – С. 45–47.

6. *Михеев*, *Г. М. Z*-сканирование при монохроматической лазерной накачке: исследование насыщенного поглощения в суспензии многослойных углеродных нанотрубок / Г. М. Михеев, Р. Ю. Кривенков, К. Г. Михеев, А. В. Окотруб, Т. Н. Могилева // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46. – № 8. – С. 719-725.

7. *Bondar*, *V. S.* Nanodiamonds for biological investigations / V. S. Bondar, A. P. Puzyr // Phys. Solid State. – 2004. – V. 46 – № 4. – P. 698–701.

8. Size effect on the optical limiting in suspensions of detonation nanodiamond clusters / V. V. Vanyukov, T. N. Mogileva, G. M. Mikheev, A. P Puzyr, V. S. Bondar, Y. P. Svirko // Appl. Opt. – 2013. – V. 52 – № 18. – P. 4123–4130.

Device for Study of Nonlinear Optical Properties of Suspensions of Nanomaterials at Higher Temperatures

A device for a research of nonlinear optical properties of the nanomaterials suspensions at higher temperatures by the z-scan technique is developed and created. The device allows to heat suspension up to 100 °C and to maintain the set temperature. The optical scheme of z-scan with use of the device is described. Operability of the device is shown by studying the optical limiting in suspension of nanodiamonds and solution of zinc phtalocyanine.

Keywords: nonlinear optical properties; optical limiting; z-scan; laser pulse; higher temperature

Секция 6. **Алгоритмы и программные системы для приборостроения**

УДК 378.147.88:811.112

А. А. Айзикович, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой
E-mail: pmi@istu.ru
Т. Г. Возмищева, кандидат физико-математических наук, доцент
Ю. П. Демаков, кандидат физико-математических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Технологии обучения иностранных студентов дисциплинам математики и информатики в техническом университете

Рассматривается влияние прикладных задач на понимание теоретического материала, билингвистического обучения и интернет-ресурсов на освоение общенациональных знаний и развитие навыков межкультурного общения. Приведены примеры проектов, выполненных на кафедре прикладной математики и информатики.

Ключевые слова: высшее образование; билингвистическое обучение; межкультурное общение

Введение

Для технических университетов в преподавании дисциплин математики и информатики большую роль играют приложения теоретического материала. Поэтому при введении какого-либо понятия необходимо рассмотреть задачи, при решении которых возникает данное понятие. Интерес у студентов возникает, если рассматривать как классические задачи, так и реальные, актуальные в настоящее время задачи. Естественно тематику задач выбрать из области исследований преподавателя. Как писал Л. Пастёр: «Никогда не существовало, и не будет существовать никаких „прикладных наук“, есть лишь приложения наук (весьма полезные!)». Уметь применять математику для постановки и решения технических задач особенно важно для инженеров.

© Айзикович А. А., Возмищева Т. Г., Демаков Ю. П., 2017

В статье представлен опыт авторов по обучению курсам высшей математики и информатики в техническом университете и исследованию роли прикладных задач в преподавании указанных дисциплин:

– российским студентам на сдвоенной специальности «инженер-переводчик» приборостроительного факультета ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

– египетским студентам Российско-Египетского университета (при ИжГТУ);

– студентам европейских университетов, проходившим стажировку на кафедре прикладной математики и информатики.

Технологии билингвистического обучения дисциплинам математики и информатики

Процесс обучения российских и иностранных студентов осуществляется в рамках модели «Английский язык как средство обучения», здесь имеется в виду билингвистическое обучение общенаучным и инженерным дисциплинам (*Bilingual Education*). Данная модель интегрирует следующие направления современного образования [1]:

– полилингвистическое формирование базовых профессионально-ориентированных знаний в конкретной предметной области;

– изучение предметной области;

– обучение английскому языку;

– информационные технологии передачи знаний в виде электронных презентаций учебного материала и билингвистические учебные пособия.

Предлагаются следующие технологии обучения дисциплинам математики и информатики: электронная презентация материала; билингвистические учебные пособия; объединение российских и иностранных студентов в группы при разработке научно-исследовательских или технических проектов.

Электронная презентация курса лекций, а также задач с решениями (на русском и английском языках) и иллюстрациями, в дальнейшем выложенная в свободном доступе в информационные ресурсы университета, приводит к более интенсивному усвоению как языка, так и предметной области, способствует самостоятельному изучению материала.

Билингвистическая структура пособий также способствует закреплению материала как на английском, так и на русском языке. Следует отметить, что русский и английский тексты независимы друг от друга, поэтому пособия могут использоваться как русскоязычными студентами, так и иностранными, проходящими обучение в российских вузах.

Билингвистическое образование дает возможность разрабатывать совместные с иностранными партнерами научно-исследовательские и технические проекты в рамках курсового проектирования, экспортировать и импортировать образовательные услуги, осуществлять обмен студентами и преподавателями в технических университетах.

Предложенные технологии способствуют обучению студентов на английском языке и иностранных студентов на русском языке на неязыковых факультетах, служат преодолению языкового барьера при обсуждении технических задач, что весьма важно в плане развития международной деятельности технических вузов.

Разработка прикладных проектов на основе информационных технологий

В качестве примеров технических заданий, выдаваемых студентам на период их стажировки, приведем две задачи, решаемые в разные годы студентами из Университета технологий г. Брно (Словакия), и научно-исследовательский проект, разработанный студентами кафедры прикладной математики и информатики ИжГТУ имени М. Т. Калашникова совместно с Физико-техническим институтом УрО РАН.

Первая задача касалась применения вейвлет-преобразования для анализа ЭГК-сигналов [2]. Здесь предполагалось изучение основ вейвлет-анализа, знакомство с видами ЭКГ-сигналов и их характерными точками и волнами, изучения пакета *MATLAB* и проведение в нем вычислительных экспериментов с различными вейвлетами, масштабами и ЭКГ-сигналами. Последние выбирались из международной медицинской базы данных. Очевидно, что автоматизация анализа ЭКГ-сигналов может способствовать более объективной постановке диагнозов врачами-кардиологами.

Вторая задача была посвящена искусственным нейронным сетям и построению на их основе маршрутизаций телекоммуникационных сетей [3]. Адаптивная маршрутизация является одной из важнейших задач для телекоммуникационных сетей различного назначения. В этом случае построение и анализ модели также проводился в пакете *MATLAB*, но с использованием системы *Simulink*. Кроме изучения необходимого теоретического материала, на построенных моделях, отличающихся различными видами нейронных сетей, проводился поиск оптимальных маршрутов на графах.

Третий проект – «Математическая модель плотной упаковки атомов» – объединяет разные области знаний: математику, физику и информатику. Поскольку гравитационный и кулоновский потенциалы одинаковы (отличаются лишь константами), то можно использовать

методы небесной механики при решении поставленной задачи [4]. В данной работе рассматривается материальная точка и сферическая поверхность, на которой равномерно распределена масса. Между этими объектами действует гравитационное притяжение. Реальные тела в природе всегда неоднородны, однако неоднородность может оказаться достаточно слабой, и можно пренебречь ею. Кроме того, рассматриваемое тело может оказаться таким, что одно или два измерения малы по сравнению с другими, тогда тело можно заменить более простой моделью. В небесной механике такими объектами может быть кольцо Сатурна, наша Галактика, которую можно рассматривать как диск или сферическая поверхность.

Для моделирования формирования кристаллических решеток в работах рассматривается модель взаимно проникающих сфер. Предполагается, что заряд внешних электронов равномерно распределен по оболочке, радиус которой и является радиусом атома. При сближении двух неоднородных шаров, моделирующих атомы, их оболочкам разрешено проникать одна в другую, при этом образуется зона взаимного проникновения (рис. 1). Взаимно проникающим сферам придаются физические свойства в соответствии с электронным строением атома.

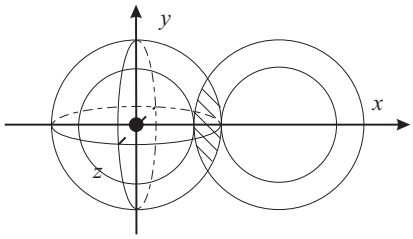


Рис. 1. Модель взаимного проникновения

Таким образом, в рамках курсового, дипломного проектирования российских и иностранных студентов реализуется идея обучения в процессе разработки научно-исследовательских и технических проектов.

Влияние прикладных задач на процесс обучения дисциплинам математики и информатики

Выделим следующие аспекты влияния практики и прикладных задач на процесс обучения дисциплинам высшей математики и информатики.

Формулировка прикладных и исследовательских задач на математическом языке приводит к более глубокому пониманию теоретических основ, на которых базируются поставленные задачи [5]:

1) применение теоретико-математических методов и информационных технологий в исследовании прикладных и научных задач определяет наиболее оптимальное направление решения поставленных задач;

2) повышение роли доказательств при изучении математических дисциплин развивает абстрактное мышление, помогает рассматривать обобщения задач;

3) иллюстрация поставленной задачи, возможность представить исследуемый объект в пространстве и на плоскости способствует решению задачи.

Отметим повышенный интерес иностранных студентов к приложениям теоретического материала. Теория и практика с использованием вычислительной математики и информационных технологий повышает мотивацию обучения студентов. Отметим также, что студенты не всегда видят прикладной характер теоретических построений, поэтому очень важно начинать процесс преподавания дисциплины с изучения технической задачи, исторического взгляда на поставленную проблему.

Таким образом, исследование реальных инженерных и научно-исследовательских задач на основе теоретических знаний определяет развитие и углубление связей между студентами различных стран.

Список литературы

1. *Возмищева*, *Т. Г.* Высшая математика. Основные термины : Higher Mathematics. Basic Terms : учеб. пособие. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2011. – 252 с.

2. *Айзикович*, *А. А.* Вопросы анализа ЭКГ-сигналов с помощью вейвлет-преобразования / А. А. Айзикович, Ю. П. Демаков, Е. Л. Колесникова, М. А. Федорова, O. Glembek // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства : тр. III Науч.-техн. конф. (Ижевск, 14–15 апр. 2006 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2007. – С. 484–488.

3. *Айзикович*, *А. А.* Построение нейросетевых моделей в системах управления маршрутизацией телекоммуникационных сетей / А. А. Айзикович, Ю. П. Демаков, Н. Г. Халфина, T. Raso // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства : тр. III Науч.-техн. конф. (Ижевск, 14-–15 апр. 2006 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2007. – С. 489–496.

4. *Возмищева*, *Т. Г.* Моделирование гравитационного и кулоновского взаимодействия сферических тел с взаимно проникающими оболочками // Вестник Ижевского государственного технического университета. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, № 4(68). – 2015. – С. 88–90.

5. *Возмищева*, *Т. Г.* Линейная алгебра и аналитическая геометрия с приложениями в научных исследованиях : учеб. пособие для студ. высш. учеб. завед. - Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2014. – 340 с.

Technologies of Foreign Students Training to Disciplines of Mathematics and Computer Science at the Technical University

The influence of applied problems on understanding a theoretical material, bilingual training and Internet resources on development of national knowledge and development of skills of intercultural dialogue is considered. The examples of the projects carried out on the chair of Applied mathematics and computer science are presented.

Keywords: higher education; bilingual training; intercultural dialogue

УДК 621.376:004.946

А. А. Айзикович, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой
E-mail: pmi@istu.ru
Ю. П. Демаков, кандидат физико-математических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
Е. А. Лучихина, магистрант
Удмуртский государтвеный университет, г. Ижевск

Реализация дельта-модуляции сигналов

Обсуждаются возможности компьютерной программы моделирования дельта-модуляции сигналов.

Ключевые слова: дельта-модуляция; компьютерное моделирование

Во многих областях науки и техники имеется необходимость в цифровой обработке сигналов (ЦОС) в реальном времени. В большинстве случаев исходным сигналом ЦОС является аналоговый. Его представление в цифровой форме осуществляется с помощью импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) или дельта-модуляции (ДМ). Импульсно-кодовая модуляция основана на аналого-цифровом преобразовании сигнала, заключающемся в дискретизации во времени, квантовании и кодировании полученных аналоговых отчетов по уровню. Многочисленные виды ДМ-представления основываются на дискретизации во времени, квантовании по уровню и кодировании разности между отчетами входного и аппроксимирующего сигналов, полученных аналоговых отчетов по уровню. Дельта-код взаимосвязан с шагами квантования и, как следствие, является более помехоустойчивым, чем ИКМ. Кроме того, разрядность ДМ-кода всегда меньше кода ИКМ. Однако, кроме шумов квантования, для ДМ характерны шумы перегрузки по крутизе, когда аппроксимирующий сигнал не успевает повторить резкое изменение входного, и которые уменьшают выбором частоты дискретизации и шагов квантования [1].

Известно несколько десятков видов ДМ, различающиеся частотой дискретизации и способом получения шагов квантования. Они делятся на ДМ с равномерным шагом квантования, недостаток которых высокая частота дискретизации, и ДМ с переменным шагом, позволяющие лучше обрабатывать резкие изменения входного сигнала.

© Айзикович А. А., Демаков Ю. П., Лучихина Е. А., 2017

Принцип действия ДМ базируется на формировании шагов квантования $\{e_k\}$ кодера на основе анализа разности отсчетов входного и ДМ-аппроксимирующего сигналов $\alpha_k = x_k - \hat{x}_k$, дискретизированные с частотой ДМ: $e_k = \varepsilon$ при $\alpha_k \geq 0$ и $e_k = -\varepsilon$ при $\alpha_k < 0$. Шаги квантования с учетом $e_k = 0,\ k < 0$ формируют аппроксимирующий сигнал (отсчеты) $\hat{x}_i = \hat{x}_{i-1} + e_i = \sum_{k=1}^{i} e_k$.

Для изучения принципов работы ДМ и изучения ее свойств реализована компьютерная программа, моделирующая работу дельта-модулятора в виде графического интефейса пользователя [2] с использованием специализированной среды *GUIDE* пакета *MATLAB* [3], являющимся мощным инструментальным средством для решения различных по природе задач (см., например, [4]).

Данная программа моделирует процесс линейной дельта-модуляции аналитических и реальных звуковых сигналов. В программе есть возможность изменять такие параметры, как шаг квантования, длительность сигнала, период дискретизации, выбирать порядок фильтра низких частот и частоту среза. Кроме того, есть возможность восстановить исходный сигнал посредством фильтрации восстановленного аппроксимирующего сигнала. Также программа рассчитывает максимальную и минимальную амплитуду для входного сигнала для избегания перегрузки по крутизне.

На рис. 1 и 2 приведены примеры работы программы.

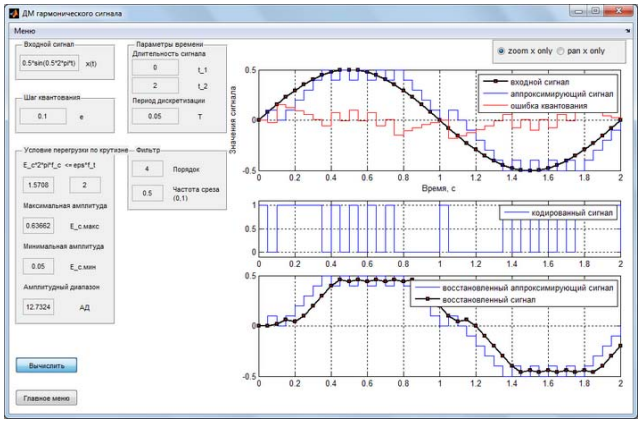


Рис. 1. Пример расчетов ДМ гармонического сигнала

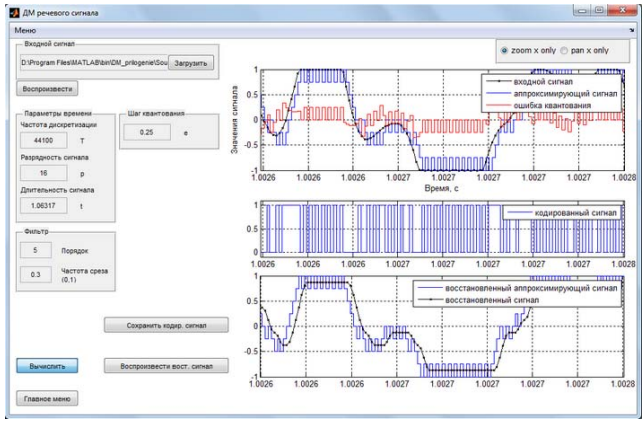


Рис. 2. Пример расчетов ДМ речевого сигнала

Отметим следующие возможности программы:

– загрузка звукового сигнала из внешнего файла;

– задание сигнала в виде аналитического выражения;

– сохранение полученных результатов моделирования в виде скриншотов интерфейса;

– сохранение введенных параметров и дальнейшая их загрузка в программу;

– масштабирование графиков;

– воспроизводение входного и восстановленного сигналов.

Для проверки правильности проведения ДМ в программе реализован простой декодер, который по кодированному сигналу восстанавливает аппроксимирующий сигнал и пропускает его через фильтр нижних частот. Достоверность полученных результатов также подтверждается совпадением их с результатами из литературы по дельта-модуляции и других источников.

Данная программа может быть использована в учебном процессе по направлениям радиотехники и связи.

Список литературы

1. *Погрибной*, *В. А.* Дельта-модуляция в цифровой обработке сигналов. – М. : Радио и связь, 1990. – 216 с.

2. *Бадриев*, *И. Б.* Разработка графического пользовательского интерфейса в среде MATLAB / И. Б. Бадриев, В. В. Бандеров, О. А. Задворнов. – Казань : Казан. ун-т, 2010. – 113 с.

3. *Ануфриев*, *И. Е.* MATLAB 7 / И. Е. Ануфриев, А. Б. Смирнов, Е. Н. Смирнова. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.

4. *Айзикович*, *А. А.* Методы распознавания типа нарушителя, применяемые в сейсмоакустических периметровых охранных системах / А. А. Айзикович, А. В. Корякин // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1. – С. 5–9.

Implementation of Delta Modulation of Signals

Discusses the possibilities of the computer program of modelling the Delta-modulation of signals.

Keywords: delta modulation; computer simulation

УДК 004.023

Е. В. Бимаков, аспирант
E-mail: bimakovskiy@ya.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Применение метода виртуального зондирования для решения задач технического зрения

Статья посвящена применению нового аппаратно-программного метода для автоматического исследования машинно-синтезированных сцен и изображений, используемых в области технического зрения. Метод позволяет создавать сверхскоростные навигационные видеоанализаторы для автономных мобильных роботов, предназначенные для оперативного контроля окружающей обстановки, быстрого поиска и коррекции маршрута движения робота, распознавания объектов-ориентиров.

Ключевые слова: анализ сцен и изображений; навигация автономных роботов; воксельные геометрические модели

Введение

В безлюдных технологиях будущего время анализа окружающих сцен автономными мобильными роботами (АМР) должно быть сравнимо со временем анализа этих сцен человеком (десятые доли секунды и меньше). Подобных бортовых навигационных видеоанализаторов сейчас нет. Статья посвящена построению сверхскоростных видеоанализаторов АМР на основе метода виртуального зондирования сцены (ВЗС) [1]. Метод опирается на специальную аппаратно-программную технологию обработки геометрической информации. Данная технология базируется на использовании т.н. воксельных вычислителей (ВВ) [2], сочетающих в себе преимущества как нейронных сетей (высокое распараллеливание процесса обработки), так и традиционных программируемых устройств (использование богатого математического аппарата).

Общая концепция виртуального зондирования сцены

Использование физического тела (исследовательского зонда), обладающего известными геометрическими и физическими свойствами для исследования геометрии реальных 3D сцен (например, изучение дна водоёма при помощи шеста) хорошо известно. Переход от реального

© Бимаков Е. В., 2017

зондирования к виртуальному зондированию сцены сопровождается замещением реального зонда и реальной зондируемой сцены их виртуальными аналогами. Эффективность машинной реализации метода ВЗС определяется скоростью перемещения виртуального зонда (поворот и параллельный перенос) в виртуальном пространстве, а также скоростью анализа на пересечение виртуального зонда с виртуальными моделями объектов зондируемой сцены. Определим термины, используемые далее.

Определение 1. *n-мерной сценой S формата* $F_S^{(n)}$ назовем семейство $S = \{E_q\}_{q \in I}$ (где $I = 1, 2, 3, \ldots q_S$) точечных множеств E_q евклидового пространства R^n, удовлетворяющее выражению:

$$\left(\forall E_q \in S\right)\left[\left(E_q \subseteq F_S^{(n)}\right) \wedge \left(\mu^{(n)}\left(E_q\right) \neq 0\right)\right],,$$

где $\mu^{(n)}\left(E_q\right)$ – *n*-мерная мера множества E_q.

Определение 2. Множество $E_q \in S$ назовем *q-м объектом n-мерной сцены S*.

Определение 3. *Обобщенным объектом сцены* $S = \{E_q\}_{q \in I}$ назовем объект $E_S = \bigcup_{q=1}^{q_S} E_q$.

Определение 4. Сцену *P* формата $F_P^{(n)}$, у которой геометрическая форма обобщенного объекта E_P и положение центра O_P системы координат $O_P X_P Y_P Z_P$ удовлетворяют условиям: $f\left(E_P\right) \subseteq F_P^{(n)} \subset F_S^{(n)}$, $O_P \equiv T_m \in F_S^{(n)}$, где $f\left(E_P\right)$ – образ обобщенного объекта E_P при произвольном пространственном повороте $f : R^n \to R^n$ множества E_P вокруг O_P, назовем *сценой P*, *зондирующей сцену S в точке* T_m.

Определение 5. *Зондом* исследуемой сцены *S* назовем обобщенный объект E_P сцены *P*, зондирующей сцену *S*.

Определение 6. *Исследуемым (зондируемым) объектом сцены S* назовем обобщенный объект E_S.

Определение 7. *Виртуальным зондированием n-мерной сцены S* назовем вычислительную процедуру, заключающуюся в последовательном выполнении одного или нескольких элементарных актов зондирования (ЭАЗ). Каждый *m*-й ЭАЗ (где *m* – номер текущего акта зондиро-

вания) состоит, в общем случае, из трёх последовательно выполняемых операций:

1) поворота $\left(f_m\right)$ зонда E_P вокруг центра O_P формата $F_P^{(n)}$ зондирующей сцены P на m-й n-мерный пространственный угол $\left(E_P \to f_m\left(E_P\right)\right)$;

2) параллельного переноса $\left(c_m\right)$ зонда $f_m\left(E_P\right)$ внутрь сцены S $\left(f_m(E_P) \to c_m(f_m(E_P)), F_P^{(n)} \to c_m(F_P^{(n)})\right)$ в точку m-го центра зондирования $(T_m \in F_S^{(n)})$ так, чтобы центр $c_m\left(O_P\right)$ зонда $c_m\left(f_m\left(E_P\right)\right)$ совпал с точкой T_m формата $F_S^{(n)}$ исследуемой сцены S. После выполнения переноса будет установлено взаимнооднозначное соответствие между точками форматов $c_m\left(F_P^{(n)}\right)$ и $F_S^{(n)}$ (а также между точками $c_m\left(f_m\left(E_P\right)\right)$ и E_S), имеющими одинаковые значения координат в системе координат зондируемой сцены (например, для $n = 3$ – $O_S X_S Y_S Z_S$);

3) определения значения функции зондирования $\Phi_m\left(c_m\left(f_m\left(E_P\right)\right), F_S^{(n)}\right)$ между точками зонда $c_m\left(f_m\left(E_P\right)\right)$ и точками $F_S^{(n)}$ исследуемой сцены S, соответствующими точкам зонда $c_m\left(f_m\left(E_P\right)\right)$.

Физический смысл виртуального зонда E_P, виртуальной сцены S и точечного множества $G \subset F_S^{(n)}$, образованного центрами зондирования сцены S, определяется характером решаемой прикладной задачи. Так применительно к задачам поиска обхода препятствий [3], E_P может выступать в качестве геометрической модели АМР, а E_S – в качестве геометрической модели обобщенного объекта-препятствия, который предстоит обойти АМР. Каждый ЭАЗ служит для выявления факта пересечения (т. е. столкновения) зонда $c_m\left(f_m\left(E_P\right)\right)$ с препятствием E_S. Для этого в каждом m-м ЭАЗ выполняется операция $M_m = c_m\left(f_m\left(E_P\right)\right) \cap E_S$, после чего определяется значение функции зондирования, а именно: предиката «$M_m = \varnothing$». Если значение этого предиката «ложно», зонд $c_m\left(f_m\left(E_P\right)\right)$ и препятствие E_S сцены объявляются виртуально столкнувшимися (рис. 1).

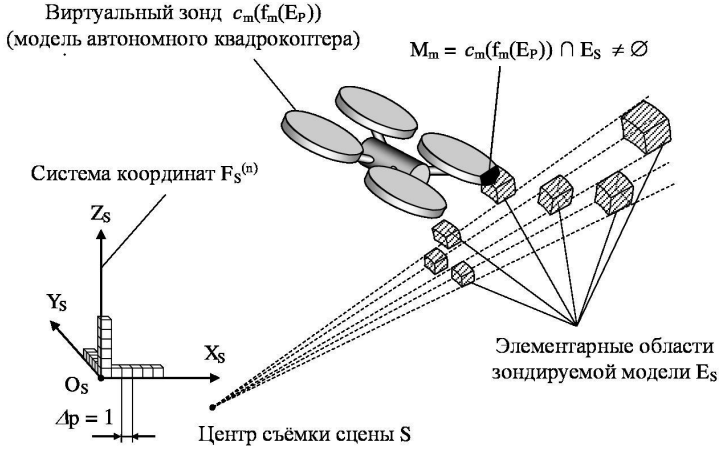


Рис. 1. Зондирование содержимого *ES* сцены *S*
виртуальным зондом $c_m\left(f_m\left(E_P\right)\right)$

При решении задач распознавания зонд E_P выступает уже в качестве *n*-мерного геометрического эталона распознаваемого объекта. Исследуемая $F_S^{(n)}$-форматная сцена выступает в роли *n*-мерного изображения-препарата, внутри которого ищется заданный распознаваемый *n*-мерный объект. Виртуальное зондирование служит в этом случае для выявления наличия (или отсутствия) совпадения геометрических свойств эталона с содержимым анализируемой сцены, а также для определения местоположения обнаруженного совпадения в пространстве исследуемой сцены.

Вышеописанная процедура ВЗС – это всего лишь идеальная версия данной процедуры, оперирующая бесконечными точечными множествами, которая не предназначена для машинной реализации. Для выполнения ВЗС с помощью программируемого устройства (ПУ) идеальная версия ВЗС должна быть модифицирована, а именно:

– точечные множества E_S и E_P должны быть представлены в памяти ПУ в виде упорядоченного массива адресуемых информационных единиц этого устройства;

– бесконечное множество *G* центров зондирования заменено дискретной траекторией зондирования, состоящей из конечного числа центров зондирования $\left(T_0, T_1, T_2, \ldots T_m, T_{m+1}, \ldots T_k\right)$.

Переход от идеальной версии ВЗС к машинной версии ВЗС неизбежно приведет к потере точности результата зондирования сцены.

Точность представления зонда и зондируемой сцены в ПУ

Геометрия зонда (E_P) может обладать бесконечно большим числом возможных вариаций (от $E_P = \varnothing$ до $E_P = F_P^{(n)}$). Отобразить в памяти ПУ все это бесконечное разнообразие содержимого сцены P посредством конечного числа двоичных накопителей можно только при условии, если каждая k-я (где $k = 1, \ldots n$) координата точки $a \in F_P^{(n)}$ будет отображаться в ПУ с некоторой погрешностью (Δp). Так как зонд E_P – объект искусственный, точность представления точки $a \in F_P^{(n)}$ в ПУ может быть любой (например, совпадающей с точностью представления двоичного числа в ПУ). При машинном выполнении ВЗС параллельный перенос E_P внутри зондируемой сцены осуществляется на вектор смещения с координатами, кратными Δp (рис. 1).

Геометрия сцены (E_S) также может отличаться бесконечно большим разнообразием (от $E_S = \varnothing$ до $E_S = F_S^{(n)}$). Представить в памяти ПУ все это бесконечное разнообразие форм и габаритов E_S посредством конечного числа двоичных накопителей можно только при условии, если каждая k-я (где $k = 1, \ldots n$) координата точки $b \in F_S^{(n)}$ будет отображаться в ПУ с некоторой погрешностью (Δs). Важной особенностью n-мерных сцен (где n = 2, 3), синтезируемых на основе данных от дальнодействующих сенсоров (видеокамер, стереокамер, лидаров и др.) и исследуемых в задачах технического зрения, является то, что погрешность Δs многократно превышает погрешность представления двоичных чисел в ПУ. При этом значение Δs определяется разрешающей способностью этих сенсоров, а при $n > 2$ имеет тенденцию к возрастанию с увеличением расстояния (l) отображаемой точки b от оптического центра съемки (из-за сканирования реальных 3D сцен дальнодействующими сенсорами в угловых единицах $\Delta\varphi$ – рис. 2).

Пусть зависимость $\Delta s(l)$ известна для любой k-й координаты зондируемой сцены, тогда пространственное положение $b \in F_S^{(n)}$ внутри зондируемой сцены будет отображаться в ПУ с точностью до некоторой замкнутой односвязной n-мерной области (назовем ее *«элементарной визуальной областью сцены»* – ЭВОС), имеющей ненулевое значение n-мерной меры. В этом случае $F_S^{(n)}$ и E_S разбивается на вза-

имно-непересекаемые ЭВОС, имеющие свою определенную геометрическую форму и объем. Присвоим каждой такой ЭВОС, принадлежащей E_S, яркость, равную 1, а ЭВОС, не принадлежащей E_S, – яркость 0. Тогда геометрия любого зондируемого объекта E_S, синтезированного средствами технического зрения, может быть представлена некоторым *n*-мерным бинарным изображением формата $F_S^{(n)}$ при условии, что геометрическая форма, габариты и пространственное положение всех ЭВОС в $F_S^{(n)}$ известны.

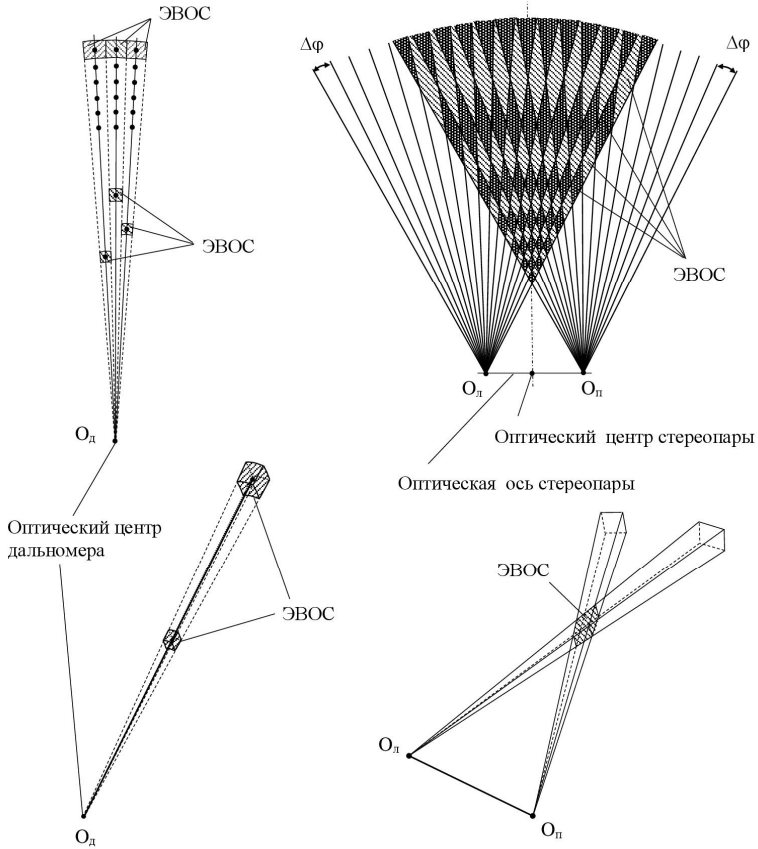


Рис. 2. Элементарные визуальные области 3D сцен (ЭВОС), построенных на основе различных дальнодействующих датчиков

При такой интерпретации исследуемой сцены наиболее перспективной для проведения ВЗС будет та аппаратно-программная технология обработки, которая обеспечивает наибольшую скорость виртуального зондирования геометрически самых сложных E_S, составленных из ЭВОС. В качестве критерия геометрической сложности E_S, составленной из ЭВОС, можно принять число ее *поверхностных* ЭВОС (т. е. ЭВОС, которые сами принадлежат E_S, а их соседние ЭВОС, входящие в $F_S^{(n)}$, E_S не принадлежат). У зондируемой E_S, обладающей предельно сложной геометрической формой (или близкой к таковой), число ее ЭВОС будет приближаться к половине всех ЭВОС, образующих $F_S^{(n)}$.

Типы ПУ – претенденты для машинной реализации ВЗС

Скорость ВЗС можно поднять:

1) путем повышения тактовой частоты ПУ;

2) распараллеливания процедур, наиболее часто используемых в алгоритме ВЗС.

В статье рассматривается второй способ, основанный на глубоком распараллеливании геометрических преобразований поворота и переноса, теоретико-множественных операций, анализа объектов на пересекаемость, вычисления *n*-мерного объема.

При обработке сцены функцию операндов выполняют геометрические модели объектов сцены. Описания геометрии зонда и зондируемой сцены, хранящиеся в памяти ПУ и участвующие в ВЗС, состоят из отдельных компонентов. Обработка этих компонентов может осуществляться в ПУ одновременно и независимо друг от друга, т. е. параллельным образом. В ПУ, использующем двоичную систему счисления, самыми низшими структурными компонентами описания сцены являются биты. Глубина распараллеливания вычислительной процедуры определяется числом одновременно обрабатываемых компонентов описания: чем выше их число, тем глубже степень распараллеливания. Поскольку число простых компонентов геометрического описания всегда превышает число сложных компонентов, то в ПУ наивысшая степень распараллеливания ВЗС может быть достигнута только на уровне битовых элементов описания геометрических моделей E_S и E_P.

В ПУ модели геометрических объектов могут храниться и обрабатываться только в виде отдельных адресуемых информационных единиц, роль которых могут выполнять:

– адресуемый бит (по-другому: нульмерное бинарное изображение – 0D-БИ);

– адресуемое двоичное слово (по-другому: одномерное бинарное изображение – 1D-БИ);

– 2D бинарное изображение (2D-БИ);

– 3D бинарное изображение (3D-БИ).

Из всех известных цифровых ПУ можно выделить 4 типа ПУ, наиболее пригодных для машинной реализации ВЗС:

1) вычислительные устройства с центральным процессором (*CPU*);

2) специализированные графические конвейерные устройства (*GPU*) [4];

3) матричные числовые процессорные устройства (препроцессоры);

4) воксельные вычислители (ВВ) [2].

CPU представляют собой классические одноядерные или многоядерные (до 8-х ядер) вычислительные устройства с центральным процессором, обладающие высокой тактовой частотой, относительно невысокой степенью распараллеливания процесса обработки. Система команд CPU предназначена для арифметической и булевой обработки только двоичных слов (1D-АБИ), представляющих собой многоразрядную линейку битов (0D-АБИ).

GPU представляют собой графические многопроцессорные конвейерные системы, содержащие до сотен процессоров и ориентированные, прежде всего, на визуализацию (рендеринг) машинно-синтезированных 3D полигональных сцен на экране растрового дисплея. Система команд *GPU* оперирует 1D-АБИ. Степень распараллеливания обработки в *GPU* выше, чем в CPU, а тактовая частота управления несколько меньше.

Препроцессоры представляют собой многопроцессорные однородные матричные *SIMD*-системы (содержащие от сотен до тысяч однородных процессоров), система команд которых оперирует 1D-АБИ и 2D-АБИ. Сверхвысокая степень распараллеливания (более высокая, чем у *GPU*) достигается только при выполнении процедур цифровой фильтрации (оконтуривание, сглаживание и т.п.), параллельных переносов и теоретико-множественных операций над содержимым 2D-АБИ.

ВВ (по-другому, устройства для высокопараллельной обработки 2- и 3-мерных изображений – УВОДТИ) [2] представляют собой сверхмногопроцессорные (от тысячи до сотен тысяч одноразрядных процессоров), система команд которых оперирует 1D-АБИ, 2D-АБИ и 3D-АБИ. Сверхвысокая степень распараллеливания достигается при выполнении процедур цифровой фильтрации, геометрических преобразований (в том числе переноса, поворота и сжатия), теоретико-множественных

операций, анализа на пересекаемость, вычислении площадей и объемов над содержимым 2D-АБИ и 3D-АБИ.

Факторы, влияющие на скорость виртуального зондирования сцены

В мобильных робототехнических приложениях время анализа сцены является чрезвычайно важным параметром, часто по своей значимости превосходящим даже точность выполняемого анализа. Скорость выполнения ВЗС в ПУ зависит от многих факторов:

1) точности применяемых геометрических моделей E_S и E_P;

2) числа центров зондирования, образующих множество G;

3) времени выполнения каждого ЭАЗ в применяемом ПУ;

4) скорости преобразования модели исследуемой сцены из одной системы координат в другую;

5) качества выбора траекторий-гипотез для проведения эвристических разведовательных перемещений виртуального зонда внутри зондируемой сцены.

Из всех перечисленных факторов наибольшее влияние на быстродействие ВЗС оказывает скорость выполнения ЭАЗ. Простейшая версия ЭАЗ включает:

1) поворот $E_P \to f_m\left(E_P\right)$;

2) параллельный перенос $f_m\left(E_P\right) \to c_m\left(f_m\left(E_P\right)\right)$;

3) чтение зондируемого участка $Z_S \subset E_S$ из памяти ПУ;

4) вычисление значения предиката «$Z_S \cap c_m(f_m(E_P) = \varnothing$», удовлетворяющего выражению:

$$\left(\forall Z_S \subset E_S\right)\left[\left(E_S \cap c_m\left(f_m\left(E_P\right)\right)\right) = \left(Z_S \cap c_m\left(f_m\left(E_P\right)\right)\right)\right].$$

Отсюда время чтения Z_S необходимо предельно сокращать. Учитывая, что n-мерный объем модели $c_m\left(f_m\left(E_P\right)\right)$ значительно уступает n-мерному объему $F_S^{(n)}$, процесс чтения должен затрагивать (по возможности) не все адресное пространство, где хранится полное описание E_S, а только ту его часть, внутри которого гарантированно находится описание Z_S. Чтобы это реализовать, между областью зондируемого пространства сцены $\left(F_S^{(n)}\right)$ и адресным пространством памяти ПУ, где хранится описание E_S, необходимо установить взаимно-

однозначную или, как минимум, корреляционную зависимость. Поскольку $F_S^{(n)}$ состоит из ЭВОС, один из вариантов установления такой зависимости заключается в выделении в памяти ПУ под описание геометрии каждого ЭВОС специально выделенной области адресов. При реализации данного требования на скорость чтения Z_S будут влиять:

– способ машинного представления и хранения геометрической модели E_S в памяти ПУ;

– размер и форма E_P, определяющие размер адресной области, содержащей Z_S.

Все эти параметры определяют адреса и число АБИ, в которых хранится геометрическое описание Z_S. Извлечение каждого АБИ из памяти ПУ производится за время, сравнимое с тактом управления ПУ.

Время выполнения функции зондирования зависит от выбора аппаратно-программной технологии обработки сцен (АПТОС) еще в большей степени, чем на этапе чтения Z_S. В ПУ, оперирующих только 1D-АБИ (это *CPU* и *GPU*) и использующих традиционные виды АПТОС, основанных на методах аналитической геометрии и линейной алгебры, соотношение времени анализа на пересекаемость зонда и сцены при исследовании сложных геометрических сцен многократно превышает время чтения Z_S. В противоположность этому использование АПТОС, основанных на применении пиксельных и воксельных геометрических моделей, многопроцессорных матричных *SIMD*-систем (препроцессоров и ВВ) этап вычисления функции зондирования крайне мал и сравним со временем извлечения АБИ из памяти ПУ независимо от геометрической сложности исследуемой сцены.

Перспективы использования различных геометрических моделей для реализации ВЗС

В настоящее время наибольшее применение для скоростной обработки 2D- и 3D-сцен нашли следующие методы геометрического моделирования:

1) метод моделирования многогранниками (многоугольниками);

2) метод моделирования поверхностями (кривыми) второго порядка;

3) дискретный (иначе пиксельный или воксельный) метод моделирования.

Моделирование E_S (E_P) многогранниками (или фигурами второго порядка) позволяет описывать некоторые частные случаи геометрической формы E_S (E_P) крайне просто. Кроме того, успехи в реализации

линейных матричных преобразований дают возможность выполнять повороты и параллельные переносы (средствами *CPU* и *GPU*) сложных полигональных моделей (а также фигур второго порядка) с высокой скоростью и исключительной точностью. Тем не менее для реализации метода ВЗС воксельные модели являются наиболее предпочтительными, так как:

1) выигрыш в описании частных случаев формы E_S (E_P) не снижает требований к емкости памяти ПУ, рассчитываемой из необходимости хранения всех моделей E_S (E_P), включая предельно сложные;

2) классическое описание моделей-многогранников и фигур второго порядка (в виде набора коэффициентов уравнений, координат особых точек) в случае моделирования геометрически самых сложных объектов E_S (E_P) оказывается чрезмерно избыточным;

3) процедура чтения Z_S при воксельном моделировании чрезвычайно проста и наименее затратна по времени, поскольку при воксельном моделировании и применении ВВ наиболее легко реализуется адресуемо-зависимый способ хранения модели исследуемой сцены, составленной из ЭВОС;

4) процедуры анализа многогранников (фигур второго порядка) на их взаимную пересекаемость чрезвычайно сложны и затратны даже в случае относительно простых геометрических фигур (не говоря уже о предельно сложных объектах E_S и E_P), в то время, как анализ на пересекаемость воксельных моделей в ВВ крайне прост и не зависит от геометрической формы воксельных моделей E_S и E_P;

5) аппаратно-программные способы реализации геометрических преобразований поворота и параллельного переноса над воксельными моделями E_S и E_P в ВВ позволяют моделировать эти геометрические преобразования со скоростями, как минимум, не уступающими линейным матричным преобразованиям над полигональными моделями в *CPU* и *GPU*, при достижением приемлемой точности.

На основе вышесказанного можно сделать вывод о безусловном премуществе для реализации ВЗС аппаратно-программной технологии обработки, базирующейся на использовании *n*-мерных воксельных геометрических моделей и возможностях, предоставляемых новым типом высокопараллельных устройств – воксельных вычислителей. Метод ВЗС может стать чрезвычайно востребованным при создании сверхманевренных, сверхадаптивных наземных, летающих, надводных и подводных малогабаритных и гуманоидных [5] АМР.

Список литературы

1. *Бимаков*, *Е. В.* Метод виртуального зондирования сцены на базе воксельной технологии обработки сцен // Информационные технологии. – 2016. – № 11 – С. 827–835.

2. *Бимаков*, *В. А.* Принципы построения и функционирования устройств для высокоскоростной обработки *n*-мерных пиксельных геометрических моделей / В. А. Бимаков, Е. В. Бимаков // Информационные технологии. – 2012. – № 6. – С. 44–49.

3. *Ferguson*, *D*. Detection, Prediction and Avoidance of Dynamic Obstacles in Urban Environments / D. Ferguson, M. Darms, C. Urmson, S. Kolski // Proceedings of the 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. – 2008. – June. – P. 1149–1154.

4. *Hermann*, *A*. GPU based Voxel-Collision-Detection for Robot Motion Planning / A. Hermann, F. Drews // IAS-13. – Padova. – 2014. – URL: http://www.gpu-voxels.org/ (дата обращения: 25.10.2016).

5. *Shuuji*, *Kajita.* Introduction to Humanoid Robotics / Kajita Shuuji, Hirukawa Hirohisa, Harada Kensuke, Yokoi Kazuhito // Springer Verlag, Berlin-Heidelberg. – 2014. – 222 p.

Application of Virtual Scene Probing for Solving Problems of Machine Vision

The article focuses on the application of the new hardware and software method for automatical analysis of computer-synthesized scenes and images that are used in the field of machine vision. The method allows to create high-speed navigational videoanalyzer for autonomous mobile robots designed for operational control of the environment, fast search and correction of robot route, object recognition.

Keywords: scene and image analysis; navigation of autonomous robot; voxel geometrical models

УДК 004.021

К. И. Дизендорф, кандидат физико-математических наук, доцент
E-mail: dki@istu.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

База данных комплексной оценки безопасности – механизм мониторинга состояния опасного объекта

Описана реализация алгоритма расчета показателя комплексной оценки безопасности на основе результатов измерений параметров техпроцесса и состояния окружающей среды, а также сведений о проведенном обслуживании оборудования. Приведены технические решения, использованные при проектировании базы данных.

Ключевые слова: комплексная оценка безопасности; система мониторинга; логическая матрица сверки; база данных

Введение

Мониторинг опасных производств строится на основе анализа разнообразных параметров техпроцесса, окружающей среды и надежности оборудования, используемого в производстве. Каждый из параметров анализируется отдельной службой, например, за параметрами техпроцесса на участке следит начальник участка. Для вышестоящего руководства (начальник цеха) зачастую достаточно знать обобщенную картину происходящего на участках. Формирование таких обобщенных показателей, отражающих картину одним числом, важная задача, решаемая системой мониторинга безопасности производства.

Постановка задачи

Пусть технологический процесс на участке характеризуется n параметрами, имеющими отношение к безопасности протекания техпроцесса. Экологическая обстановка описывается m параметрами, которые фиксируются специальными приборами, размещенными на участке и вокруг него. В техпроцессе задействовано k единиц оборудования, неисправность которых может повлечь за собой возникновение опасной ситуации. Первые два вида параметров снимаются автоматически приборами с частотой F_1, а информация о состоянии оборудования обновляется с частотой F_2. Вся информация хранится в специализированной базе данных системы мониторинга.

© Дизендорф К. И., 2017

Необходимо реализовать алгоритм расчета комплексной оценки безопасности участка (КОБО), основанный на бинарной критериальной структуре с использованием логических матриц свертки [1], средствами СУБД MS SQL Server 2008 R2. Результаты расчетов необходимо предоставлять программе визуализации, для предъявления пользователю графика изменения КОБО как всего участка, так и отдельных направлений, и отдельных показателей.

В качестве дополнительных условий выдвигается требование реализации алгоритма в форме, позволяющей корректировать параметры матриц, без корректировки кода алгоритма.

Теоретическая база алгоритмов

Предлагается [2] проводить анализ по комплексной оценка безопасности, измеряемой по трехбалльной шкале: 1 – высокий риск возникновения чрезвычайной ситуации, 3 – минимальный риск, 2 – пограничные переходные значения риска.

Оценка безопасности строится на основе трех направлений: безопасность технологического процесса, экологическая безопасность и безопасность оборудования [2]. Каждое направление характеризуется своим набором первичных показателей, значение каждого из которых оценивается по трехбалльной шкале. По этому набору рассчитывается значение оценки безопасности для направления (КО-Х). Схема формирования КОБО на основе оценок для направлений приведена на рис. 1.

Для расчета составного показателя на основе двух предыдущих используются логические матрицы свертки [3]. Схема расчета приведена на рис. 2. Здесь предполагается нумерация строк снизу-вверх, а столбцов – слева-направо; используются значения – 1, 2, 3.

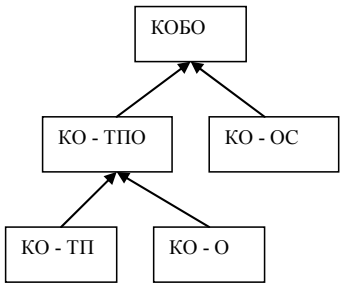


Рис. 1. Поэтапное формирование оценки КОБО: КО-О – оценка безопасности оборудования; КО-ТП – оценка безопасности техпроцесса; КО-ОС – оценка безопасности окружающей среды; КО-ТПО – оценка безопасности двух направлений; КОБО – комплексная оценка безопасности

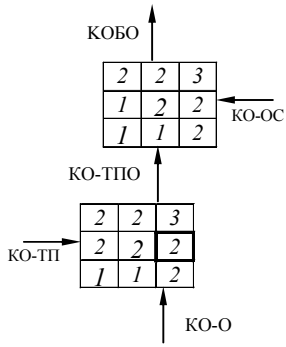


Рис. 2. Расчет комплексной оценки безопасности с помощью матрицы свертки

Рассчитанные значения первичных показателей, показателей направления, а также показателя КОБО сохраняются в БД, чтобы пользователю можно было предъявить развертку КОБО на любой момент времени.

Это позволит оперативно выяснить причину низкого уровня оценки безопасности.

Реализация

Для хранения рассчитанных значений, параметров алгоритма расчета была создана отдельная БД КОБО. Ее наполнение строится на основе регулярного обращения к БД результатов измерений (1 раз в минуту) и БД состояния оборудования (1 раз в сутки).

Сразу же при переносе происходит расчет оценок безопасности значений первичных показателей и их сохранение в БД КОБО. Далее запускается процедура расчета КОБО для момента времени, за который были получены данные.

Дерево расчета «зашито» в поцедуру, а матрицы свертки хранятся в отдельной таблице. Такой подход позволяет корректировать алгоритмы расчета (элементы матрицы сверток), без внесения изменений в исходный код, т. е. без привлечения программиста-разработчика.

Отдельно пришлось решать проблему подготовки данных для модуля визуализации КОБО – программы, показывающей в реальном времени как меняется показатель КОБО, имеющей возможность развертки показателя до уровня первичных показателей.

С этой целью была созадана и оперативно обновлялась таблица Work_Kobo_Monitoring, содержащая три поля: KOBO_Value – значение КОБО на интервале, Start_Date – момент начала интервала

и Finish_Date – момент окончания интервала. Это позволило в реальном времени обновлять показываемые данные.

Предложенная модель расчета КОБО (по трехбалльной шкале) была реализована на одном из производственных объектов повышенной опасности.

Выводы

При реализации описанного подхода к расчету и хранению истории комплексной оценки безопасности были достигнуты следующие результаты:

1) апробация системы показала применимость подхода для решения задач мониторинга на производственных объектах;

2) опробована возможность проводить подстраивание алгоритма в процессе эксплуатации системы;

3) система позволяет демонстрировать пользователю динамику изменения КОБО в реальном времени.

Список литературы

1. *Бурков*, *В. Н.* Механизмы управления эколого-экономическими системами / В. Н. Бурков, Д. А. Новиков, А. В. Щепкин ; под ред. акад. С. Н. Васильева. – М. : Изд-во физико-математ. лит., 2008. – 244 с.

2. Информационно-управляющая система комплексной безопасности потенциально опасного объекта – как многокритериальная задача выбора оптимального решения / А. В. Толстых, В. Н. Бурков, А. В. Щепкин, И. В. Партанский // Проблемы управления безопасностью сложных систем : тр. XIX Междунар. конфер. ; под ред. Н. И. Архиповой, В. В. Кульбы. – 2011. – С. 428–433.

3. Целенаправленный выбор: модели, отношения, алгоритмы. Препринт / А. М. Анохин, В. А. Глотов, В. В. Павельев, А. М. Черкашин / ИПУ РАН. – М., 1996. – С. 10–21.

The Database of Complex Assessment of Safety – the Mechanism of Condition Monitoring of a Dangerous Object

Implementation of an calculation algorithm of measure of complex assessment of safety is based on measurements results of technical process parameters and state of environment, and also data on the carried-out hardware maintenance is described. The technical solutions used in case of design of the database are given.

Keywords: complex assessment of safety; monitoring system; logic array of a check; database

УДК 550.8.05

А. Г. Злобина, младший научный сотрудник
О. М. Немцова, кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
E-mail: ELF54@yandex.ru
Физико-технический институт УрО РАН, г. Ижевск

Визуализация данных малоглубинной электроразведки и моделирование 3D-границ погребенного объекта

Рассматривается метод визуализации данных малоглубинной электроразведки, основанный на построении векторной картины изменений проводимости среды. Для определения глубины залегания погребенного объекта выполняется анализ векторной картины с использованием функции косинус. Границы выявленного объекта определяются методом нечеткой кластеризации.

Ключевые слова: малоглубинная электроразведка; визуализация данных; векторный анализ; нечеткая кластеризация

Введение

Обработка и визуализация измерительной информации играют большую роль в информационно-измерительных системах. Информационно-измерительные системы получения и анализа геофизических данных должны содержать разнообразные методы визуализации данных с целью получения качественной интерпретации результатов. Полученные геофизические данные представлены, как правило, в виде графиков или карт и несут в себе информацию о неоднородностях вдоль профилей или по площади в определенном интервале глубин. Обработка геофизических данных малоглубинной электроразведки осложняется наличием существенно неоднородного приповерхностного слоя грунта. Чтобы обеспечить достоверность оценки 3D геометрических параметров объекта необходимо использовать априорные сведения о форме объекта поиска и глубине залегания.

Результатом применения метода сопротивления в малоглубинной электроразведке является набор данных, характеризующих проводимость исследуемой среды. Наличие в среде объекта с проводимостью, отличной от окружающей (токовые линии втягиваются в проводящие

© Злобина А. Г., Немцова О. М., 2017
Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-06-04239а.

и огибают непроводящие включения), отражается на значениях плотности тока измеряемой на поверхности. Для определения глубины залегания объекта применяется такой прием, как изменение величины разноса электродной установки.

Отличные результаты по определению формы объекта и его местоположения показал метод векторной съемки, идея которого состоит в измерении сразу нескольких компонент электрического поля с учетом знака принимаемого сигнала [1]. По поведению аномальных векторов кажущегося сопротивления вблизи неоднородности легко построить карту распределения вторичных источников, визуальный анализ которой позволит достоверно определить местоположение неоднородностей. Однако метод векторной съемки практически не используется, так как требует специального оборудования и специализированной информационно-измерительной системы.

Метод моделирования и визуализации данных

В работе предлагается метод моделирования и визуализации данных, основанный на идее векторного анализа и не требующий специального оборудования. Рассмотрим модельный пример. На глубине 0,20–0,50 м расположен объект – прямая восьмиугольная призма, Т-образной формы (рис. 1). Сетка электродов выбрана 21×21, шаг между электродами составляет 0,50 м, исследуемая область 10×10 м.

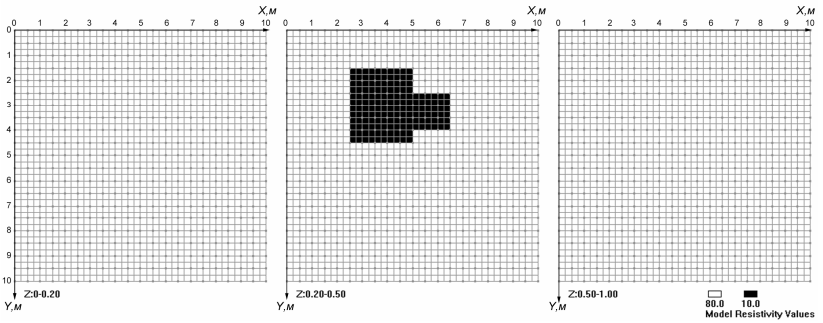


Рис. 1. Расположение модельного объекта в однородном грунте

Сопротивление среды равно 80 Ом, объекта – 10 Ом. С помощью программы *Res3mod* [2] смоделированы значения сопротивления, получаемые при использовании электродных установок типа *pole-pole* и экваториальный диполь.

Полученные с помощью установки *pole-pole* значения сопротивления характеризуют проводимость среды в точке привязки результата, расположенной на половине расстояния между питающим и принимающим электродами. Глубина анализируемого участка так же равна половине расстояния между электродами. Таким образом, значения сопротивления на определенной глубине определяются с помощью набора пар электродов, удаленных друг от друга на одинаковом расстоянии. Для выявления модельного объекта достаточно анализировать значения сопротивления в окне размером 3×3 электрода (1,0×1,0 м). Размер окна задает количество анализируемых глубин (для окна 3×3 – 5 глубин: 0,25, 0,35, 0,50, 0,56, 0,71 м). На каждой глубине выполняется усреднение значений сопротивления по окну. Если таким скользящим окном проанализировать всю исследуемую область, то формируется матрица значений сопротивлений, характеризующих каждую глубину. Очевидно, что для однородной среды значения сопротивлений на каждой глубине свои, но одинаковые для всей области. Наличие в слое неоднородности приводит к изменению средних значений сопротивлений. Отклонение средних значений сопротивлений позволяет построить векторную картину изменений сопротивлений для каждой глубины (рис. 2).

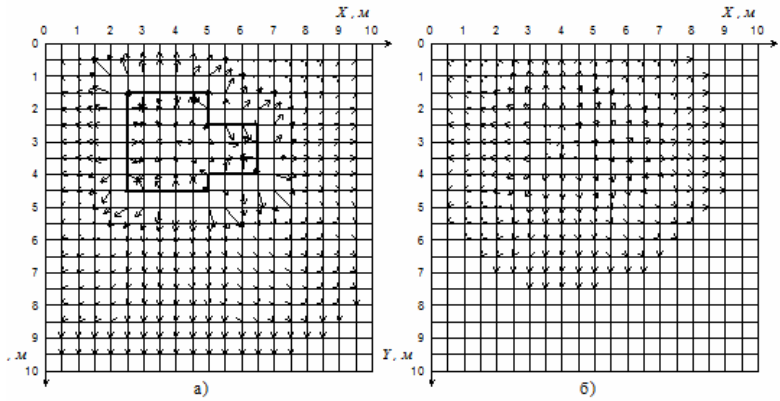
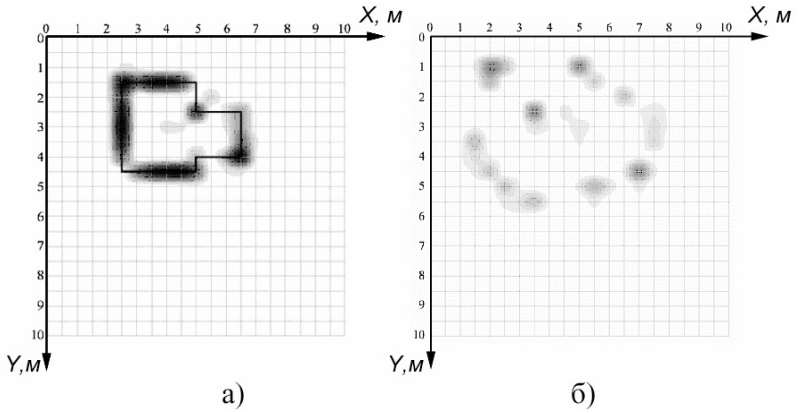


Рис. 2. Векторная картина изменения сопротивлений для глубин:
а – 0,50 м, есть объект; *б* – 0,71 м, нет объекта

Для определения расположения объекта по глубине используется анализ векторных картин сопротивлений двух смежных глубин с помощью функции косинус. Известно, что косинус угла между двумя

векторами меняет знак в зависимости от величины угла между ними. Следовательно, смена направлений векторов на противоположные при переходе с одной глубины на другую будет отражаться на картине косинусов в виде отрицательных значений. Визуализация картины косинусов с помощью программы *VisualGeo* [3] позволяет указать границы залегания погребенного объекта (рис. 3), белым цветом показаны значения косинуса равные 1, черным цветом – равные –1.

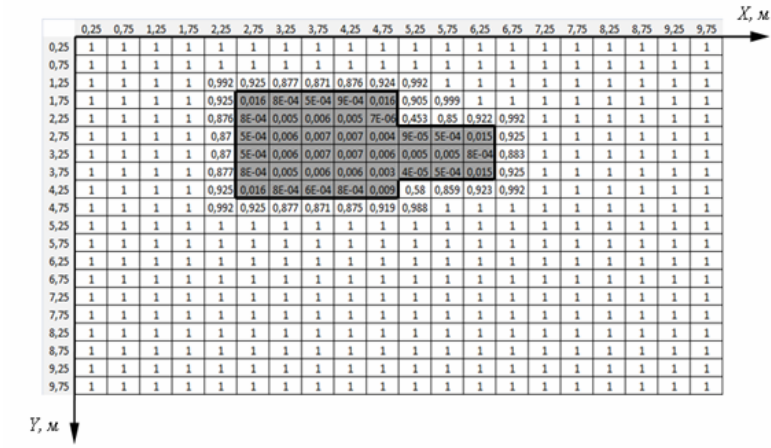


а) б)

Рис. 3. Картина косинусов для двух смежных глубин:
а – 0,35 м и 0,50 м – есть объект; *б* – 0,50 м и 0,71 м – нет объекта

Полученная таким образом априорная информация о глубине залегания объекта далее используется для определения границ объекта в плоскости. Для выбранной глубины (0,50 м) смоделированы с помощью программы *Res3mod* значения кажущегося сопротивления, получаемые при использовании установки экваториальный диполь с шагом 1,0 м. Анализируя полученные данные с помощью метода нечеткой кластеризации определяются границы объекта. Разбивая данные на два класса («Фон» и «Аномалия») в результате работы алгоритма *fuzzy c-means* [4] формируется двумерный массив. Значение каждого элемента массива отражает степень принадлежности соответствующего участка исследуемой области к тому, или иному классу (рис. 4). Серым цветом выделена область расположения объекта поиска, черным контуром отмечена его истинная граница. Основанием включения текущего элемента массива данных в конкретный класс является сравнение его степени принадлежности с заданным порогом – α-сечением. При α-сечении, равном 0,5, восстановленная граница объекта поиска пол-

ностью совпадает с его смоделированной границей. Таким образом, применяя метод нечеткой кластеризации, границы выявленного модельного объекта установлены.



	0,25	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75	3,25	3,75	4,25	4,75	5,25	5,75	6,25	6,75	7,25	7,75	8,25	8,75	9,25	9,75
0,25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1,25	1	1	1	1	0,992	0,925	0,877	0,871	0,876	0,924	0,992	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1,75	1	1	1	1	0,925	0,016	8E-04	5E-04	9E-04	0,016	0,905	0,999	1	1	1	1	1	1	1	1
2,25	1	1	1	1	0,876	8E-04	0,005	0,006	0,005	7E-06	0,453	0,85	0,922	0,992	1	1	1	1	1	1
2,75	1	1	1	1	0,87	5E-04	0,006	0,007	0,007	0,004	9E-05	5E-04	0,015	0,925	1	1	1	1	1	1
3,25	1	1	1	1	0,87	5E-04	0,006	0,007	0,007	0,006	0,005	0,005	8E-04	0,883	1	1	1	1	1	1
3,75	1	1	1	1	0,877	8E-04	0,005	0,006	0,006	0,003	4E-05	5E-04	0,015	0,925	1	1	1	1	1	1
4,25	1	1	1	1	0,925	0,016	8E-04	6E-04	8E-04	0,009	0,58	0,859	0,923	0,992	1	1	1	1	1	1
4,75	1	1	1	1	0,992	0,925	0,877	0,871	0,875	0,919	0,988	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5,25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6,25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7,25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8,25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9,25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Рис. 4. Массив степеней принадлежности к классу «Фон»

Выводы

Предложенный метод визуализации и моделирования данных малоглубинной электроразведки позволяет определять 3D-границы погребенного объекта. Визуальный анализ построенной векторной картины изменений проводимости среды дает достоверную априорную информацию о местоположении погребенного объекта. Использование функции *косинус* в качестве характеристики изменения векторной картины проводимости среды решает проблему определения глубины залегания погребенного объекта. На выявленной глубине границы модельного объекта успешно восстанавливаются методом нечеткой кластеризации.

Список литературы

1. Геоэкологическое обследование предприятий нефтяной промышленности / под ред. проф. В. А. Шевнина и доц. И. Н. Модина. – М.: РУССО, 1999. – 511 с.

2. ГеофизПоиск. Инженерно-геофизическая компания. – URL: http://geophyspoisk.com/methods. (дата обращения: 14.11.2016).

3. *Журбин*, *И. В.* Многоэлектродная аппаратура и программное обеспечение для малоглубинной электроразведки в археологии / И. В. Журбин, Д. В. Груздев // Разведка и охрана недр. – 2004. – № 12. – С. 37–38.

4. *Злобина*, *А. Г.* Восстановление границы объекта по данным малоглубинной электроразведки методом нечеткой кластеризации / А. Г. Злобина, И. В. Журбин // Геоинформатика. – 2015. – № 3. – С. 19-25.

Data Visualization of Shallow Electrical Prospecting and Simulation of 3D Borders of the Buried Object

We consider data visualization method for shallow electrical, based on the construction of the vector pattern of conductivity changes in the environment. To determine the depth of the buried object is analyzed using vector pattern cosine function. The boundaries of the identified object are determined by fuzzy clustering method.

Keywords: shallow electrical exploration; data visualization; vector analysis; fuzzy clustering method

УДК 539.261

С. М. Мокрова, младший научный сотрудник
В. Н. Милич, кандидат технических наук, зав. отделом
E-mail: lssm@ftiudm.ru
Физико-технический институт УрО РАН, г. Ижевск

Компьютерный метод определения анизотропии по неполным прямым полюсным фигурам

Предлагается комбинированная методика определения свойств материала, включающая в себя два метода. На первом этапе предложенным в настоящей статье методом анализируется текстура образца, вычисляются текстурные компоненты и их доли. На втором этапе обработки данных по найденным с заданной точностью текстурным компонентам по известному методу определяется анизотропия упругих свойств материала.

Ключевые слова: анизотропия упругих свойств; текстурные компоненты; неполная прямая полюсная фигура; объектно-векторное представление плоскостей отражения; пространство Родрига

Основной задачей текстурного анализа является определение анизотропии свойств материала. Анизотропия материала зависит от многих параметров, например, таких как расположение включений (примесей), но определяющим фактором является текстура материала [1]. Под текстурой понимают наличие в материале преимущественных ориентаций кристаллитов (зерен) или текстурных компонент.

Нужно отметить, что ярко выраженная текстура, а следовательно, и анизотропия не всегда желательна для требуемых свойств материала. В ряде случаев материалы должны обладать изотропными свойствами. Например, при сильной анизотропии в процессе осевой вытяжки на заготовках образуются фестоны, обрезка которых приводит к расходам материала. С другой стороны, для создания активных диэлектриков и сверхпроводников наоборот необходимы материалы с сильной анизотропией свойств.

Таким образом, актуальной является задача разработки метода быстрого анализа текстуры, позволяющего по рассчитанным преимущественным ориентациям вычислить анизотропию свойств материала. Это особенно важно при производстве изделий, свойства которых зависят от кристаллографического направления. В настоящей работе

© Мокрова С. М., Милич В. Н., 2017

описывается комбинированная методика определения свойств материала, направленная на вычисление коэффициентов анизотропии. На первом этапе с использованием предложенного автором метода по одной неполной прямой полюсной фигуре (НППФ) с заданной точностью определяются все текстурные компоненты и их доли [2]. На втором этапе, на основании полученных данных, по методу, описанному в работе [3], вычисляется анизотропия свойств материала.

Анализ текстуры производится с помощью представления плоскостей отражения в виде полярного комплекса векторов [2]. Метод позволяет анализировать как слабые, так и острые многокомпонентные текстуры. Метод заключается в следующем. НППФ дискретизируется и интерполируется с шагом 1°. Комплекс векторов вращается относительно трех пространственных осей с шагом 1°. При совпадении стереографических проекций векторов с областями на НППФ, имеющими ненулевые значения интенсивности, ориентация считается найденной. Таким образом, находятся все ориентации, присутствующие на НППФ. Для выбора наиболее достоверных ориентаций производится сортировка ориентаций по признаку максимальной интенсивности их полюсов. Из узлов НППФ, имеющих ненулевую интенсивность, вычитаются значения интенсивности соответствующих им полюсов отсортированных ориентаций. Достоверные ориентации переводятся в пространство Родрига, где каждой ориентации соответствует вектор Родрига, вычисленный по формуле $\vec{R} = \vec{n} \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$. Использование пространства Родрига позволяет из массива ориентаций путем кластеризации сформировать текстурные компоненты с заданным радиусом рассеяния. Таким образом, количество текстурных компонент, описывающих текстуру на НППФ, может отличаться в зависимости от требований к точности описания текстуры. Текстурная компонента представляет собой множество близких ориентаций. Для каждой текстурной компоненты определяется центр, рассеяние и доля относительно общего количества ориентаций.

Для решения практических задач необходимо связать найденные текстурные компоненты с анизотропией физических свойств материала. Как известно, анизотропия определяется двумя факторами: ориентационными факторами текстуры и характеристическим параметром монокристалла материала. Причем характер изменения анизотропии зависит от текстурных компонент, а значение модуля анизотропии – от параметра монокристалла.

В работе [3] предлагается метод для определения анизотропии упругих свойств, выраженной коэффициентами пластической анизотропии μ. Для листов прокатки, обладающих ортотропной симметрией, вычисляются три параметра μ_{21}, μ_1 и μ_{12}, коэффициенты поперечной деформации, измеренные под соответствующим углом относительно направления прокатки. Средний показатель упругой анизотропии всего материала определяется выражением:

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_{21} + 2\mu_1 + \mu_{12}}{4}. \tag{1}$$

В статье [4] показано, что этих параметров достаточно для описания анизотропии в листах проката. В монографии [3] представлены формулы для вычисления μ, определяющие взаимосвязь между факторами текстуры и коэффициентами анизотропии:

$$\begin{gathered} \mu_{ij} = 0,5 + 0,5 \cdot \frac{\Delta_k - \Delta_i}{Q - \Delta_j}, \\ \mu_i = 0,5 + 0,5 \cdot \frac{\Delta_i + \Delta_j - 0,5 \cdot \Delta_k - 0,5}{2 \cdot Q + \left(\Delta_i + \Delta_j - 1,5 \cdot \Delta_k - 0,5\right)}, \end{gathered} \tag{2}$$

где Δ_i (i = 1, 2, 3) – ориентационные факторы текстуры относительно основных направлений обработки образца; Q – характеристический параметр монокристалла материала.

Из формул (2) следует, что при μ = 0,5 материал изотропен. Отклонения значения μ от 0,5 показывает степень анизотропии материала.

Характеристический параметр монокристалла материала Q зависит от кристаллической решетки материала и определяется через коэффициенты тензора податливости монокристалла. Текстурные факторы вычисляются по формуле

$$\Delta_i = \left\langle a_{i1}^2 a_{i2}^2 + a_{i2}^2 a_{i3}^2 + a_{i3}^2 a_{i1}^2 \right\rangle, \tag{3}$$

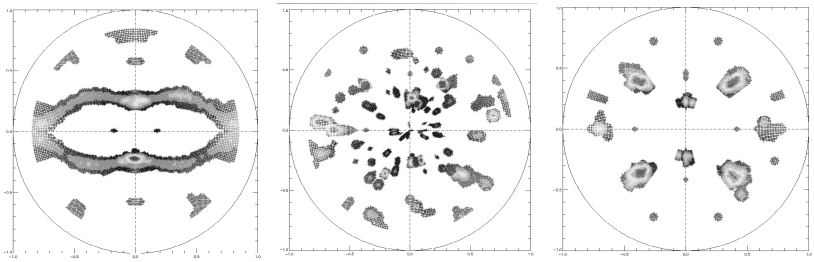
где a_{ij} – направляющие косинусы текстурной компоненты относительно i-го направления в кристалле, $\langle \ldots \rangle$ определяют среднее значение по всем текстурным компонентам с учетом их доли.

В методе [3] текстурные факторы одного образца Δ_i (i = 1, 2, 3) вычисляются по трем обратным полюсным фигурам (ОПФ), снятым для направления прокатки (НП), поперечного направления (ПН) в плоскости листа и направления нормали к плоскости листа (НН). Обратные

полюсные фигуры показывают вероятность совпадения некоторой ориентации с важным направлением в образце (например, с направлением прокатки). ОПФ, как и ППФ, снимается на рентгеновском дифрактометре. Однако подготовка образцов для съемки ОПФ весьма трудозатратна и может привести к большим погрешностям измерения ОПФ и, следовательно, параметров анизотропии.

В нашем методе [2] текстура определяется по одной неполной ППФ, анализируя которую получаем все текстурные компоненты, присутствующие в образце. Формулы (2) позволяют проанализировать взаимосвязь между показателями анизотропии, характеристическим параметром монокристалла и найденными текстурными компонентами материала. Текстурные компоненты Δi вычисляются по формулам (2) относительно трех основных осей обработки материала НП, ПП, ПН по всем текстурным компонентам с учетом их доли в образце.

Для подтверждения преимуществ предложенной методики исследованы три прямые полюсные фигуры для плоскостей отражения {111}, снятые с образцов высокочистого алюминия после разных режимов обработки (рис. 1) [5]. Первая ППФ представляет образец после деформации (прокатки) с высокой степенью обжатия. Второй образец также подвергался деформации с последующим отжигом при температуре 450 °С в течение получаса. Третий образец после деформации был отожжен в вакууме при температуре 550 °С в течение 1 часа.



а *б* *в*

Рис. 1. Прямые полюсные фигуры для плоскостей отражения {111}, снятые с образцов алюминия: *а* – образец после деформации; *б* – образец после отжига при температуре 450 °С в течение получаса; *в* – образец после отжига в вакууме при температуре 550 °С в течение 1 часа

В выполненном исследовании для каждого образца рассчитываются показатели анизотропии как для каждой текстурной компоненты,

входящей в образец, так и общий показатель анизотропии материала. Текстурные компоненты и их доли были определены в работе [2]. Из литературы известно, что характеристический параметр монокристалла алюминия Q равен 1,24.

В таблицах представлены все найденные по ППФ текстурные компоненты, выраженные векторами Родрига (графа 1), и их доли (графа 2). Для каждой текстурной компоненты по формуле (2) вычислены текстурные факторы Δ_i (графа 3) и параметры μ_{21}, μ_1, μ_{12} (графа 4), оказывающие ее влияние на общий показатель анизотропии материала (табл. 1–3). В последней строке приведены средневзвешенные показатели, вычисленные с учетом долей текстурных компонент. Общий показатель, определяющий уровень анизотропии материала, находится в ячейке, выделенной серым цветом.

Первые два образца имеют многокомпонентную текстуру. Из табл. 1 видно, что параметры анизотропии практически всех текстурных компонент близки к 0,5 (последняя колонка). Поэтому образец является изотропным, его средневзвешенное значение анизотропии равно 0,5.

Таблица 1. **ППФ после деформации**

№	Текстурные компоненты вектор Родрига			Доля, %	Факторы текстуры			Показатели анизотропии			$\bar{\mu}$
					Δ_1	Δ_2	Δ_3	μ_{21}	μ_1	μ_{12}	
1	0,19	0,25	–0,29	24,2	0,29	0,24	0,23	0,49	0,54	0,47	0,51
2	0,23	0,15	–0,32	17,3	0,27	0,28	0,19	0,45	0,53	0,46	0,49
3	0,13	0,28	–0,18	14,7	0,25	0,14	0,23	0,55	0,50	0,49	0,51
4	0,27	0,19	0,32	13,2	0,25	0,31	0,25	0,47	0,54	0,50	0,51
5	0,29	0,08	–,4	12,4	0,28	0,31	0,20	0,44	0,54	0,45	0,49
6	0,22	0,13	0,19	7,7	0,15	0,22	0,19	0,48	0,49	0,52	0,50
7	0,18	0,25	0,39	5,5	0,29	0,31	0,21	0,45	0,54	0,46	0,50
8	0,11	0,17	–0,06	3,6	0,11	0,06	0,13	0,53	0,43	0,51	0,48
9	0,33	0,02	0,4	1,5	0,26	0,33	0,23	0,45	0,55	0,48	0,51
Средневзвешенные по всей текстуре					0,26	0,25	0,21	0,48	0,53	0,48	0,50

Показатели анизотропии текстурных компонент второго образца имеют больший разброс относительно значения 0,5. Коэффициенты анизотропии преимущественных ориентаций, составляющих 69 %, равны 0,5 и определяют изотропный образец. Но при этом средневзвешенное значение анизотропии всего материала (серая ячейка) равно 0,49. Свойства материала близки к изотропному (табл. 2).

В третьем образце присутствуют три текстурных компоненты, причем преимущественная ориентация составляет почти 76 %. При $\mu_{21} = \mu_{12} = 0{,}5$, $\mu_1 = 0{,}38$, т. е. относительно направления прокатки и попе-

речного направления лист изотропен, но под углом 45° относительно направления прокатки проявляется значительная анизотропия. Известно, что наличие преимущественных кубических {001}<100> и близких к ней ориентаций приводит к возникновению в материале сильной анизотропии. Средневзвешенное значение анизотропии по всему материалу (серая ячейка) равно 0,46 (табл. 3).

Таблица 2. **ППФ после отжига**

№	Текстурные компоненты вектор Родрига			Доля, %	Факторы текстуры			Показатели анизотропии			$\bar{\mu}$
					Δ_1	Δ_2	Δ_3	μ_{21}	μ_1	μ_{12}	
1	0,10	0,27	–0,10	23,4	0,21	0,07	0,21	0,57	0,47	0,50	0,50
2	0,23	0,16	0,26	22,9	0,22	0,27	0,21	0,47	0,52	0,49	0,50
3	0,16	0,24	0,28	22,8	0,28	0,25	0,20	0,48	0,53	0,46	0,50
4	0,05	0,04	0,04	13,8	0,01	0,02	0,02	0,50	0,38	0,50	0,44
5	0,19	0,20	–0,14	5,6	0,17	0,16	0,21	0,52	0,48	0,52	0,50
6	0,06	0,05	–0,35	2,8	0,24	0,24	0,02	0,39	0,50	0,39	0,44
7	0,26	0,11	0,38	2,8	0,25	0,32	0,20	0,44	0,54	0,47	0,50
8	0,09	0,22	–0,34	2,5	0,30	0,24	0,16	0,46	0,53	0,43	0,48
9	0,07	0,05	0,36	2,1	0,24	0,25	0,03	0,39	0,50	0,39	0,44
10	0,39	0,34	0,08	1,3	0,25	0,25	0,33	0,54	0,54	0,54	0,54
Средневзвешенные по всей текстуре					0,20	0,18	0,17	0,50	0,49	0,49	0,49

Таблица 3. **ППФ после отжига в вакууме**

№	Текстурные компоненты вектор Родрига			Доля, %	Факторы текстуры			Показатели анизотропии			$\bar{\mu}$
					Δ_1	Δ_2	Δ_3	μ_{21}	μ_1	μ_{12}	
1	0,04	0,05	0,04	75,9	0,02	0,01	0,02	0,50	0,38	0,50	0,44
2	0,21	0,23	–0,12	18,9	0,18	0,17	0,24	0,53	0,49	0,53	0,51
3	0,18	0,25	0,29	5,2	0,28	0,26	0,22	0,48	0,53	0,47	0,50
Средневзвешенные по всей текстуре					0,06	0,06	0,07	0,51	0,41	0,50	0,46

Выводы

Объединение предложенного метода и известного метода определения анизотропии упругих свойств, выраженной коэффициентами пластической анизотропии, позволяет провести полный анализ образца, т. е. сделать расшифровку текстуры по одной НППФ и по полученным данным определить анизотропию свойств материала. При этом текстура описывается совокупностью текстурных компонент, определенных с заданной точностью.

Исследование трех НППФ, проведенное по комбинированному методу, показало, что материал первого и второго образцов изотропен, это позволяет использовать его при производстве изделий методом

листовой штамповки. Материал третьего образца можно использовать для создания изделий, требующих усиления некоторого свойства в определенном направлении.

Методика, объединяющая предложенный метод анализа текстуры, использующий пространство Родрига, и метод вычисления коэффициентов упругой анизотропии, позволяет более эффективно и быстро решать задачи текстурного анализа, получая коэффициенты анизотропии материала.

Список литературы

1. *Адамеску*, *Р. А*. Анизотропия физических свойств металлов / Р. А. Адамеску, П. В. Гельд, Е. А. Митюшов. – М : Металлургия, 1985. – 136 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 // Вестн. Удм. ун-та. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2016. – Т. 26. Вып. 3. – С. 336–344.

3. *Гречников*, *Ф. В*. Деформирование анизотропных материалов (Резервы интенсификации). – М. : Машиностроение, 1998. – 448 с.

4. *Гречников*, *Ф. В.* К расчету среднего значения коэффициента анизотропии листовых материалов / Ф. В. Гречников, Я. А. Ерисов, В. М. Зайцев // Изв. Самар. науч. центра РАН. – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 154–157.

5. Текстурные преобразования при отжиге алюминиевых фольг. 1. Сильные текстурные компоненты / Д. Б. Титоров, В. А. Волков, В. П. Лебедев, Ф. В. Минеев, Д. В. Титорова // ФММ. – 2006. – Т. 102, № 1. – С. 1–7.

Computer Method for Anisotropy Determination by the Incomplete Direct Pole Figures

The article deals with the combined method of the determination of the material properties, including two methods. At the first stage by the proposed method the sample texture is analyzed, textural components and their shares are calculated. In the second stage by texture components found with desired accuracy, using a known method, the anisotropy of the elastic properties of the material is determined.

Keywords: the anisotropy of the elastic properties; textural components; incomplete direct pole figure; object-vector representation of the reflection planes; Rodrigues vector

УДК 528.85:517.44

А. И. Назмутдинова, младший научный сотрудник
В. Н. Милич, кандидат технических наук, зав. отделом
E-mail: lssm@ftiudm.ru
Физико-технический институт УрО РАН, г. Ижевск

Системный анализ задачи интерпретации космических снимков площадных объектов местности

Приведен системный анализ задачи интерпретации данных дистанционного зондирования Земли. Исследованы особенности съемочной аппаратуры, свойства объектов местности, отображаемые на снимке, а также свойства изображений, определяющие постановку задачи распознавания и методы ее решения. Рассмотрено понятие трудноразличимых объектов на снимке. Проведенный анализ позволил выявить недостатки существующих методов интерпретации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли; площадные объекты местности; системный анализ; трудноразличимые объекты; методы интерпретации

Задача интерпретации космических снимков, ее сложность, пути ее решения во многом, определяются свойствами изображения. Космические многозональные изображения являются результатом взаимодействия объектов местности со съемочной системой (взаимодействие не является контактным: съемочная система фиксирует отраженный солнечный свет от объектов местности). Поэтому свойства интерпретируемого изображения зависят от свойств объектов местности, свойств съемочной системы и условий съемки. Системный анализ перечисленных факторов в сочетании с учетом требований к результатам решения задачи интерпретации изображений объектов позволяет определять актуальные направления разработки методов интерпретации. Представленный в настоящей работе системный анализ основан на литературных источниках [1–3] и результатах выполненных автором исследований [4]. Анализ проведен на данных различных съемочных систем с различными характеристиками: пространственное разрешение – от 1 м (БПЛА) до 5 м (*RapidEye*); спектральное – от 5 каналов (*RapidEye*) до 7 каналов (*QuickBird*); радиометрическое – от 8 (БПЛА) до 12 бит (*RapidEye*). Объектами исследования являлись изображения площадных объектов растительности.

© Назмутдинова А. И., Милич В. Н., 2017

Схема системных связей процесса формирования изображения объектов местности при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) представлена на рис. 1. Рассмотрим характеристики качества снимков, которые оказывают существенное влияние на решение задачи интерпретации изображений. Для получения изображения объектов местности используются съемочные системы, которые могут быть установлены как на искусственные спутники Земли, так и на низколетящие беспилотные или другие летательные аппараты. Качество получаемых изображений определяется разрешением снимка, а также искажениями, возникающими в процессе съемки. Данные ДЗЗ характеризуются пространственным, спектральным и радиометрическим разрешением.

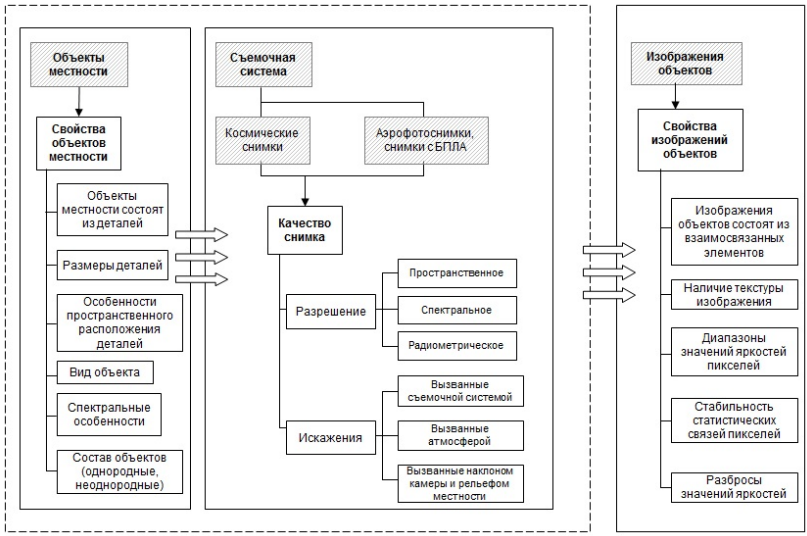


Рис. 1. Схема системных связей процесса формирования изображения объектов местности при дистанционном зондировании

Под пространственным разрешением понимается «размер на местности самой малой детали, воспроизведенной на снимке» [3]. При рассмотрении задач распознавания и картографирования площадных объектов местности используют, как правило, снимки среднего (6–10 м), высокого (1–6 м) и сверхвысокого разрешения (менее 1 м).

Ширина спектрального канала определяет спектральное разрешение данных ДЗЗ. В зависимости от спектрального разрешения и коли-

чества зон выделяют панхроматические, многозональные (3–15 каналов) и гиперзональные изображения (сотни узких спектральных каналов). Высокое спектральное разрешение позволяет расширить круг решаемых по таким снимкам задач.

Радиометрическое разрешение определяется количеством уровней дискретизации яркостей отраженных объектом солнечного излучения. Большинство снимков имеют стандартное разрешение в 6–8 бит, однако, существуют снимки с более высоким разрешением в 10–12 бит.

При дистанционном зондировании Земли из космоса в процессе фиксирования отраженного солнечного излучения неизбежны искажения, возникающие по разным причинам, главными из которых являются: свойства атмосферы, через которую проходит отраженный солнечный свет; оптические измерительные характеристики съемочной системы; рельеф местности и наклон камеры [5]. Съемочная аппаратура, фиксируя отраженный солнечный свет от объектов на поверхности земли, формирует изображение, свойства которого во многом определяются объектами, которые на них изображены.

Рассмотрим свойства объектов местности, которые оказывают влияние на формирование изображения. Прежде всего, все объекты местности состоят из деталей. Например, деталями лесов являются отдельные деревья, деталями городских застроек выступают дома и т. д. На изображении детали объекта выражаются элементами изображения объекта, которыми могут выступать как отдельные пиксели, так и их компактные группы. Размер деталей объектов местности играет важное значение, поскольку от него, а также от пространственного разрешения снимка зависит различимость структуры изображения.

Все объекты местности характеризуются своей пространственной структурой, которая определяется размерами и формой объекта и составляющих его элементов, а также характером их пространственного размещения. На характер пространственного размещения элементов структуры оказывает влияние тип объекта местности (компактные, линейные и площадные объекты [2]).

Многозональная съемка позволяет отражать на мультиспектральных снимках уникальные особенности объектов в разных зонах электромагнитного спектра. На изображении спектральные особенности объектов выражаются в значениях яркостей пикселей в каналах изображений.

На спектральные особенности объектов влияет масса факторов, среди которых, например, фенологическое состояние растительности, однородность объектов по составу и др. Однородность или неоднородность объектов по составу свойственна, в первую очередь, для

площадных объектов, таких как леса. Например, объект «еловый лес» является однородным по составу, а «мешанный лес» – неоднороден по составу. Распознавание классов объектов, которые неоднородны по составу, является более сложной задачей, поскольку для таких объектов наблюдается значительный разброс в значениях спектральных признаков и большая неоднородность элементов изображения.

Для использования данных ДЗЗ необходимо определиться с постановкой задачи и методами ее решения, что, в свою очередь, зависит от характеристик снимка. На рис. 2 представлена схема зависимости выбора метода решения задачи интерпретации от пространственного и спектрального разрешений снимка.

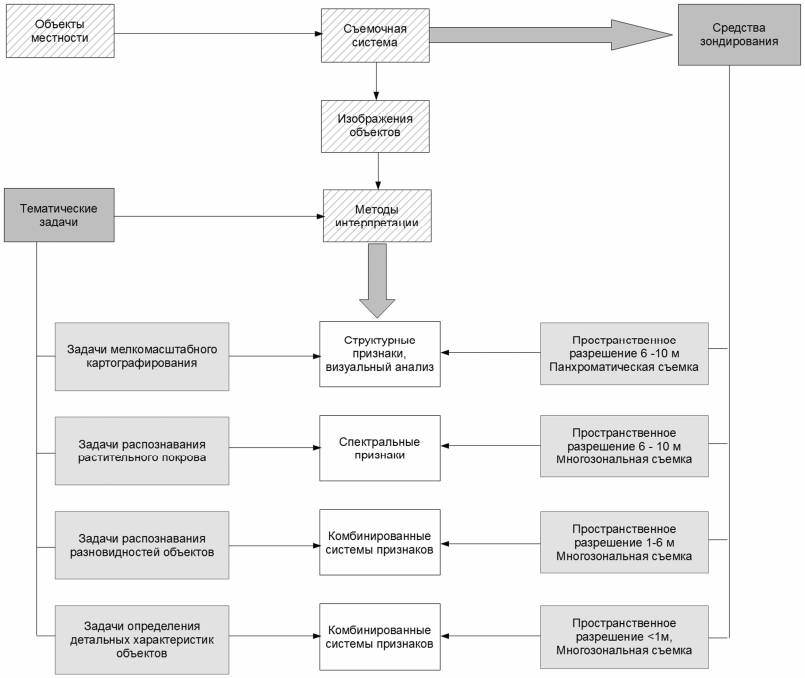


Рис. 2. Методы анализа данных дистанционного зондирования площадных объектов растительности

Снимки с более высоким пространственным разрешением позволяют ставить новые задачи, решение которых было невозможным при работе со снимками более низкого разрешения. При работе со

снимками, разрешение которых хуже 6 м, как правило, решались задачи мелкомасштабного картографирования. На таких снимках хорошо видны города, леса, поля и др. крупные объекты. Если такой снимок не является многозональным, то эффективным методом интерпретации может служить визуальный анализ, а также методы классификации с использованием структурных признаков. Если такой снимок является многозональным, то возможно эффективное распознавание растительных покровов земли с частичным решением задачи определения разновидностей при использовании спектральных методов классификации.

Используя снимки с пространственным разрешением в 1–6 м, становится возможным рассмотрение задач распознавания разновидностей объектов, чьи детали имеют размеры на границе разрешения снимка (разновидности лесов). Многозональность таких снимков в разы увеличивает надежность классификации. В этом случае решение задачи с высоким процентом точности возможно при использовании комбинированной системы признаков, включающей в себя и структурные, и спектральные характеристики.

Снимки сверхвысокого разрешения (менее 1 м) изображения позволяют решать задачи определения детальных характеристик объектов также при использовании комбинированной системы признаков.

Задача интерпретации площадных объектов местности по космическим снимкам, рассматриваемая в настоящей работе, входит в класс задач распознавания разновидностей объектов по снимкам высокого разрешения. При ее решении необходимо согласовано рассматривать свойства исследуемых объектов и качество снимка. Схема системного анализа рассматриваемой задачи представлена на рис. 3.

Все рассматриваемые далее объекты местности являются площадными. В зависимости от размеров деталей объектов и пространственного разрешения снимка возникают свойства различимости изображений объектов. Согласно этим свойствам все объекты на снимке можно разбить на три группы: визуально различимые, трудноразличимые и неразличимые объекты. Понятие трудноразличимых объектов на снимке было введено А. Н. Живичиным [2], согласно которому вероятность распознавания P объекта на изображении определяется зависимостью:

$$P = \exp\left[-\left(B\frac{A}{L}\right)^2\right],$$

где B – коэффициент распознавания формы объекта; A – минимальный размер различимой детали на местности; L – максимальный размер объекта на местности.

Предполагая $A \approx L$, что характерно, в частности, для изображений лесной растительности, и учитывая, что значения коэффициента B находятся в диапазоне от 1 до 3, получим, что P не превосходит 0,35. Если задаться требуемой вероятностью распознавания на уровне 0,7–0,8, то величина отношения A/L составит 3,0–4,0, т. е. для уверенного распознавания необходимо, чтобы разрешение снимка было как минимум в 3 раза больше размеров деталей объектов.

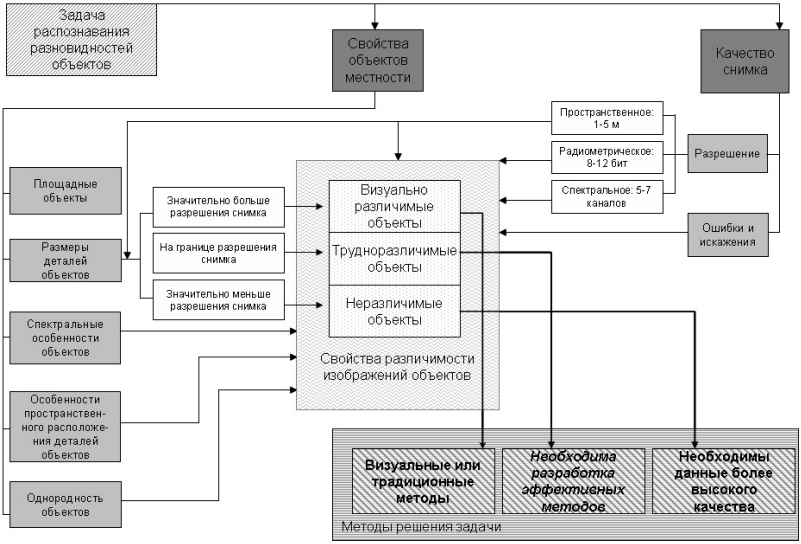


Рис. 3. Системный анализ задачи распознавания разновидностей площадных объектов растительности

Таким образом, степень различимости объектов определяется соотношением размеров их деталей и пространственным разрешением снимка. Так, например, при исследовании разновидностей и характеристик объектов лесной растительности для уверенного визуального распознавания необходимы изображения с разрешением менее 1 м.

В зависимости от того, насколько различим исследуемый объект на снимке, а также от ряда других свойств объектов местности и характе-

ристик снимка выбирается метод распознавания. При рассмотрении визуально различимых объектов эффективно применяются визуальные методы анализа, а также традиционные методы распознавания (классификатор минимального расстояния, максимального правдоподобия и др.). При распознавании трудноразличимых на снимке объектов существующие методы не всегда позволяют получать результаты с высокой точностью распознавания, поэтому необходимы новые методы для решения этой задачи. В случае исследования объектов, которые на выбранном снимке неразличимы, следует рассмотреть возможность их исследования на снимке более высокого пространственного и спектрального разрешения.

Таким образом, для решения задачи распознавания площадных объектов местности на снимках высокого разрешения необходимы новые методы, основанные на сочетании спектральной и структурной информации изображения.

Выводы

В результате исследования сделаны выводы:

1) Качество результатов интерпретации космических снимков земной поверхности зависит от свойств объектов местности, характеристик съемочной системы и условий съемки.

2) Особый класс изображений объектов местности составляют трудноразличимые объекты, к которым относятся объекты с размерами деталей на пороге разрешения снимка.

3) Для трудноразличимых объектов существующие методы распознавания данных ДЗЗ недостаточно эффективны. Необходима разработка новых эффективных методов.

Список литературы

1. *Шовенгердт*, *Р. А.* Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. – М. : Техносфера, 2010. – 560 с.

2. *Живичин*, *А. Н.* Дешифрирование фотографических изображений / А. Н. Живичин, В. С. Соколов – М. : Недра, 1980. – 253 с.

3. *Лабутина*, *И. А.* Дешифрирование аэрокосмических снимков : учеб. пособие для студентов вузов. – М. : Аспект Пресс, 2004. – 184 с.

4. *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.

5. *Милич*, *В. Н.* Метод анализа текстурных изображений с компенсацией влияния фотографического канала / В. Н. Милич, А. И. Мурынов // Автометрия. – 1996. – № 1. – С. 59–63.

System Analysis of the Interpretation Problem of Satellite Images of Polygon Objects

In the paper a system analysis of the problem of interpretation of remote sensing data is presented. The features of imaging equipments, properties of the terrain objects presented in the image and the properties of the images that define the recognition problem and methods of its solution are considered. The concept of objects that difficult to distinguish is discussed. The analysis revealed the shortcomings of existing methods of interpretation.

Keywords: earth remote sensing; area objects; system analysis; objects difficult to distinguish; interpretation methods

Электронное научное издание

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ В XXI ВЕКЕ – 2016.
ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

Сборник материалов XII Международной
научно-технической конференции
(Ижевск, 23–25 ноября 2016 года)

Корректор *Н. К. Швиндт*
Верстка *Н. В. Паклиной*

Директор Издательства ИжГТУ *Г. А. Осипова*

Подписано к использованию 09.06.2017. Объем 32,2 МБ. Заказ № 142

Издательство Ижевского государственного технического университета
имени М. Т. Калашникова. 426069, Ижевск, Студенческая, 7