

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Николаев А. В.	АО «НИИФИ»	
ФОРМИРОВАНИЕ ВОПРОСОВ КАДРОВОЙ ПОЛИТИКИ АО «НИИФИ» В УСЛОВИЯХ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММЫ «ЦИФРОВАЯ ЭКОНОМИКА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»		7
Майоров А. В., Малышев А. В.	АО «НИИФИ»	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСТОЧНИКА ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА СИСТЕМУ ИЗМЕРЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДАТЧИКОВ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ТИПА		12
Бастрыгин К. И., Трофимов А. А.	АО «НИИФИ»	
СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ, МОНИТОРИНГА, КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ		18
Косников Ю. Н.		
ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ИНТЕРФЕЙСНОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ ВИЗУАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ		26
 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ		
Щевелев А. С., Савенков А. В., Рязанцев Д. А.	АО «НИИФИ»	
ПРОСТРАНСТВЕННО ОРИЕНТИРОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ		32

Санников С. П., Побединский В. В., Побединский А. А.
МОДЕЛЬ РАССЕЙВАНИЯ РАДИОВОЛН
В ЛЕСНОЙ СРЕДЕ

39

ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Баранов А. С. АО «НИИФИ»
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

49

Ларкин М. С., Поспелов А. В. АО «НИИФИ»
КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ
СМЕЩЕНИЯ НУЛЯ УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ
ТАНГАЖА И КРЕНА «УИТК»

55

Шокоров В. А. АО «НИИФИ»
РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ
И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

60

Трофимов А. А., Рязанцев Д. А., Тимонин Р. М. АО «НИИФИ»
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОНИЖЕННОГО
ДАВЛЕНИЯ НА ДАТЧИК ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

67

Кудрявцева Д. А. АО «НИИФИ»
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ
РАЗМЕРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО
ЭЛЕМЕНТА КРЕМНИЕВОГО РЕЗОНАНСНОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ

74

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Абрамов С. В. АО «НИИФИ»
ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХЧАСТОТНОГО МЕТОДА
ВЫДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОГО СИГНАЛА
ПРИ ПОСТРОЕНИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ
ПЕРВИЧНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

82

Крайнова К. Ю. АО «НИИФИ»
ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО
ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛМАЗА

90

Гришко А. К., Кочегаров И. И., Лысенко А. В.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО
ВАРИАНТА СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
НА ОСНОВЕ ИНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛИЗА
СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИИ

97

Васильев В. А., Самошин А. В.

АО «НИИФИ»

ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОВРЕМЕННЫХ CAE-ПРОГРАММ
И ПРИБЛИЖЕННЫХ МЕТОДИК АППРОКСИМАЦИИ
ДИАГРАММ « σ - ϵ » ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРУГО-
ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

108

Сердечный Д. В., Томашевский Ю. Б.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЗАРЯДА МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ
ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

115

Полосин В. Г.

ПОСТРОЕНИЕ ФАЗОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ
В ПРОСТРАНСТВЕ ЭНТРОПИЙНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО
ПОТЕНЦИАЛА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРДЦА

124

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

CONTENT

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNOLOGY

Nikolaev A. V.

HR POLICIES DEVELOPMENT AT «NIIFI» JSC
WITHIN THE EXECUTION OF THE «DIGITAL ECONOMY
OF THE RUSSIAN FEDERATION» PROGRAMME

7

Mayorov A. V., Malyshev A. V.

A STUDY OF THE INFLUENCE OF THE VOLTAGE REFERENCE
OF THE SYSTEM ABSOLUTE PRESSURE MEASUREMENT
BASED ON SENSORS PIEZORESISTIVE TYPE

12

Bastrygin K. I., Trofimov A. A.

THE MEASUREMENT SYSTEM, MONITORING, CONTROL
AND DIAGNOSTICS PARAMETERS OF THE ROCKET ENGINE

18

Kosnikov Y. N.

ORGANIZATIONAL OPTIMIZATION OF THE INTERFACE
SPACE FOR VISUAL MONITORING OF MULTI-PARAMETRIC
OBJECTS

26

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNOLOGY

Shchevelev A. S., Savenkov A. V., Ryazantsev D. A.

SPATIAL ORIENTED METHOD OF DETERMINING STRAIN
FOR THE PREVENTION OF ACCIDENTS

32

Sannikov S. P., Pobedinsky V. V., Pobedinskiy A. A.

MODEL SCATTERING OF RADIO WAVES IN A FOREST

39

MECHANICAL MEASUREMENTS

Baranov A. S.

MODERN TECHNOLOGY OF MICROELECTROMECHANICAL
SYSTEMS DESIGN

49

Larkin M. S., Pospelov A. V.

COMPENSATION FOR THE TEMPERATURE INSTABILITY
OF THE ZERO OFFSET UNIT OF MEASUREMENT
OF PITCH AND ROLL «UITK»

55

Shokorov V. A.

DEVELOPING AND APPLICATION OF PRESSURE
AND TEMPERATURE SENSORS BASED ON
MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS
FOR PART SPACE-AND-ROCKET ENGINEERING

60

Trofimov A. A., Ryazantsev D. A., Timonin R. M.

MODELING OF THE INFLUENCE OF THE LOWERED
PRESSURE ON SENSOR OF THE LINEAR DISPLACEMENT

67

Kudryavtseva D. A.

RESEARCH OF INFLUENCE OF THE CONSTRUCTIVE SIZES
ON CHARACTERISTIC THE SENSITIVE ELEMENT
OF A SILICON RESONANT PRESSURE TRANSDUCER

74

THE MEASUREMENT OF ELECTRICAL AND MAGNETIC QUANTITIES

Abramov S. V.

THE USE OF DUAL-FREQUENCY ALLOCATION
METHOD IN THE CONSTRUCTION
OF INFORMATIVE SIGNAL MEASURING CIRCUITS
OF THE PRIMARY EDDY CURRENT PROBES

82

Kraynova K. Y.

MANUFACTURING TECHNOLOGY
OF THE SEMICONDUCTOR SENSITIVE ELEMENT
OF THE PRESSURE SENSOR BASED
POLYCRYSTALLINE DIAMOND

90

Grishko A. K., Kochegarov I. I., Lysenko A. V.

MULTICRITERIAL CHOICE OF THE OPTIMAL VARIANT
OF A COMPLEX TECHNICAL SYSTEM
BASED ON THE INTERVAL ANALYSIS
OF WEAKLY STRUCTURED INFORMATION

97

Vasiliev V. A., Samoshin A. V.

THE REVIEW OF MODERN CAE-PROGRAMS
AND THE APPROACHED APPROXIMATION TECHNIQUES
OF DIAGRAMS « σ - ϵ » FOR THE DECISION PROBLEMS
OF ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION

108

Serdechnyy D. V., Tomashevskiy Yu. B.

THE CONTROL OF A MULTI-ELEMENT
CHARGE LITHIUM-ION BATTERIES

115

Polosin V. G.

THE CONSTRUCTION OF PHASE TRAJECTORIES
IN THE SPACE OF THE ENTROPY-PARAMETRIC
POTENTIAL FOR THE STUDY OF THE DYNAMIC
CHARACTERISTICS OF THE HEART

124

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.78.002.5

DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-1

А. В. Николаев

ФОРМИРОВАНИЕ ВОПРОСОВ КАДРОВОЙ ПОЛИТИКИ АО «НИИФИ» В УСЛОВИЯХ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММЫ «ЦИФРОВАЯ ЭКОНОМИКА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»

A. V. Nikolaev

HR POLICIES DEVELOPMENT AT «NIIFI» JSC WITHIN THE EXECUTION OF THE «DIGITAL ECONOMY OF THE RUSSIAN FEDERATION» PROGRAMME

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Обозначены современные тенденции развития российской экономики. Целью работы является определение направлений формирования вопросов кадровой политики АО «НИИФИ» в условиях реализации программы «Цифровая экономика Российской Федерации». *Материалы и методы.* Рассмотрены основополагающие документы, регламентирующие цели, задачи, основные положения и технологии реализации программы «Цифровая экономика Российской Федерации». Показано, что качество подготовки инженерных кадров становится одним из ключевых факторов конкурентоспособности государства, основой для его технологической, экономической независимости. *Результаты.* Для повышения качества подготовки инженерных кадров в АО «НИИФИ» организована кафедра «Ракетно-космическое и авиационное приборостроение», что позволяет приблизить программу обучения студентов к требованиям предприятий оборонно-промышленного комплекса и других отраслей промышленности. *Выводы.* Деятельность кафедры позволила интенсифицировать работу со студентами старших курсов ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» в направлении получения профессиональных знаний и практических инженерных навыков, что способствует повышению технической грамотности, самостоятельности и инициативности молодых специалистов.

A b s t r a c t. *Background.* Current trends of the Russian economic development have been outlined. The paper objective is to define the areas of HR policies development at «NIIFI» JSC within the execution of the «Digital Economy of the Russian Federation» Programme. *Materials and methods.* Ruling documents defining purpose and objectives, fundamental principles and execution techniques of the «Digital Economy of the Russian Federation» Programme have been discussed. It has been demonstrated that quality of engineering personnel training is becoming one of the key elements for the state competitive ability, foundation for its technological and economic self-sufficiency. *Results.* In order to improve the quality of engineering personnel training «NIIFI» JSC has launched «Rocket-and-space and aeronautic instrument engineering» specialized department which makes it possible to advance students

training programme closer to the requirements of enterprises within the military-industrial complex and other branches of industry. **Conclusions.** The specialized department activities have resulted in enhancement of senior students' engagement at Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education (FSBEI of Higher Education) «Penza State University» in the line of getting professional knowledge and practical engineering skills boosting technical literacy, self-sufficiency and proactivity of the recent graduates.

К л ю ч е в ы е с л о в а: цифровая экономика, кадровая политика, интеллектуальное производство, киберфизические системы управления.

Key words: digital economy, HR policy, smart manufacturing, cyber physical control systems.

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт физических измерений (АО «НИИФИ») в течение более 55 лет является одним из ведущих предприятий Российской Федерации по производству датчиков, владеет широкой гаммой технологий мирового уровня. Сегодня АО «НИИФИ» входит в состав интегрированной структуры АО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем» (АО «РКС») и с 2015 г. является в корпорации центром компетенций по датчико-преобразующей аппаратуре, системам и пьезотехнике.

Ученые и инженеры предприятия проводят комплексные научные исследования, разрабатывают на основе новейших конструктивно-технологических решений датчики, преобразователи и системы на их основе для современной и перспективной космической техники, промышленного сектора производства, атомной энергетики, предприятий топливно-энергетического и оборонно-промышленного комплекса. За последние годы предприятие расширило возможности измерения существующих и освоило измерения ряда новых параметров, в том числе температуры, высокочастотной вибрации и др. Сформированы новые требования к датчикам, технологиям их изготовления и материалам в направлении повышения их функциональных возможностей. Сегодня мы создаем датчики с элементами самодиагностики и интеллектуализации процессов обработки информации, используя микро- и нанотехнологии, пьезокерамические материалы, золь-гель пасты для изготовления чувствительных элементов полупроводниковых датчиков газового анализа по толсто пленочной технологии. Разработаны и внедрены интеллектуальные системы мониторинга и контроля наземной безопасности агрегатов систем и сооружений стартовых комплексов СК 17П32-5, 6 космодрома «Байконур».

НИИФИ с каждым годом все активнее использует свои «космические» технологии для производства продукции, ориентированной на общепромышленный рынок [1–4]. Руководство предприятия и АО «РКС», ориентируясь на происходящие на мировом рынке технологий процессы, считает, что сегодня недостаточно владеть определенными технологиями, иметь кадровый потенциал и богатый опыт. Для того чтобы соответствовать вызовам времени, необходимо переходить на качественно новый этап развития.

С развитием высоких технологий происходит кардинальное изменение механизмов и условий прогресса техники и технических знаний. Определяющим становится не разработка и расчет основных процессов и конструкций, а сочетание разнообразных комбинаций уже сложившихся объектов техники, видов инженерной и проектной деятельности, технологических и изобретательских процессов, что способствует такому развитию промышленности, которое сопровождается ростом системной научной и исследовательской деятельности, формированием базы новых знаний и новых индустрий, появлению инновационных прорывных технологий.

Это прослеживается в послании Федеральному собранию от 1 декабря 2016 г. Президента РФ. Предложено «запустить масштабную системную программу развития экономики нового технологического поколения, так называемой цифровой экономики», в реализации которой следует «опираться именно на российские компании, научные, исследовательские и инженерно-инжиниринговые центры страны». Как отметил В. В. Путин, «это вопрос национальной безопасности и технологической независимости России, в полном смысле этого слова – нашего будущего».

Дальнейшее развитие концепция создания цифровой экономики в России получила в речи Президента РФ на XXI Петербургском экономическом международном форуме, проходившем 1–3 июня 2017 г.

Одним из направлений, имеющим системное значение, отмеченное В. В. Путиным, является намерение «кратно увеличить выпуск специалистов в сфере цифровой экономики, а, по сути, нам предстоит решить более широкую задачу, задачу национального уровня – добиться всеобщей цифровой грамотности. Для этого следует серьезно усовершенствовать систему образования на всех уровнях: от школы до высших учебных заведений. И, конечно, развернуть программы обучения для людей самых разных возрастов» [5].

По поручению Президента РФ Правительство подготовило и утвердило распоряжением от 28 июля 2017 г. № 1632-р программу «Цифровая экономика Российской Федерации» [6].

Концептуально цифровая экономика представлена тремя следующими уровнями, которые в своем тесном взаимодействии влияют на жизнь граждан и общества в целом:

- среда, которая создает условия для развития платформ и технологий, эффективного взаимодействия субъектов рынков и отраслей экономики (сфер деятельности) и охватывает нормативное регулирование, информационную инфраструктуру, кадры и информационную безопасность;

- платформы и технологии, где формируются компетенции для развития рынков и отраслей экономики (сфер деятельности);

- рынки и отрасли экономики (сферы деятельности), где осуществляется взаимодействие конкретных субъектов (поставщиков и потребителей товаров, работ и услуг).

В связи с тем, что эффективное развитие рынков и отраслей (сфер деятельности) в цифровой экономике возможно только при наличии развитых платформ, технологий, институциональной и инфраструктурной сред, программа «Цифровая экономика» сфокусирована на двух верхних уровнях цифровой экономики – базовых направлениях, определяя цели и задачи развития:

- основных инфраструктурных элементов цифровой экономики (информационная инфраструктура, информационная безопасность);

- ключевых институтов, в рамках которых создаются условия для развития цифровой экономики (нормативное регулирование, кадры и образование, формирование исследовательских компетенций и технологических заделов).

Для нашего предприятия стратегически важно, что цифровая экономика является новым способом общественного производства, в котором преобладающей должна стать доля научно-инженерного труда.

АО «НИИФИ» сегодня в непростых условиях развития экономики пытается найти свою нишу для расширения рынков сбыта продукции. Продукция АО «НИИФИ» может быть использована при организации «интеллектуального» производства, киберфизических систем управления, работающих в «жестких» (высокие и низкие температуры, давления, вибрационные и ударные нагрузки и другие внешние воздействующие факторы) условиях применения, в целом ряде других общепромышленных отраслей экономики и развивающихся научных направлений.

Мы понимаем, что для создания продукции мирового уровня необходимо в первую очередь уже в настоящее время существенно повысить уровень подготовки инженерных кадров, которые впоследствии будут способны ее создавать.

Качество инженерных кадров становится одним из ключевых факторов конкурентоспособности государства и, что принципиально важно, основой для его технологической, экономической независимости. За последние годы предпринят ряд шагов, направленных на укрепление отечественной инженерной школы. Созданы национальные исследовательские университеты, ориентированные на подготовку современных технических кадров. Удалось повысить уровень подготовки специалистов, в том числе по таким критически важным направлениям, как авиационная, космическая, атомная, автомобильная промышленность, металлургия, энергетическое машиностроение [7].

Понимая важность задачи повышения качества подготовки инженерных кадров, в 2014 г. АО «НИИФИ» и ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» в дополнение к успешно функционирующему с 2005 г. Научно-образовательному центру ПГУ-НИИФИ организовали кафедру «Ракетно-космическое и авиационное приборостроение». Организация

кафедры позволила еще более приблизить программу целевого обучения студентов к требованиям предприятий оборонно-промышленного комплекса и других отраслей промышленности. Выпускники высшего учебного заведения сразу без дополнительного обучения или переучивания могут работать в условиях современного рынка, использовать IT-технологии, иметь широкую техническую и экономическую эрудицию. Применяя приобретаемые знания на практике уже в процессе обучения, общаясь с опытными специалистами-разработчиками, принимая непосредственное участие в разработке приборов на всех ее этапах и в сопровождении на производстве, молодые инженеры учатся быть не только технически грамотными, самостоятельными, энергичными, но и предприимчивыми, инициативными, подходить творчески к любой работе. Эта политика уже сегодня приносит свои плоды. Хочется отметить, что многие из молодых ученых занимают руководящие должности на предприятии и успешно справляются с решением сложных научных и административных вопросов.

Немного статистики: на сегодня в АО «НИИФИ» работают 5 докторов технических наук и 31 кандидат технических наук, только за последние 5 лет защитили кандидатские диссертации 12 сотрудников. В настоящее время 14 сотрудников проходят целевое обучение в аспирантуре и 9 сотрудников являются соискателями степени кандидата технических наук.

В данном выпуске журнала представлены в основном работы молодых сотрудников, недавних выпускников, многие из которых обучаются в аспирантуре или недавно защитили кандидатскую диссертацию по тематике работ нашего института.

Надеюсь, став высококвалифицированными специалистами, они будут способствовать переходу предприятия в современных условиях на качественно новый уровень развития, что позволит АО «НИИФИ», сегодня успешно решающему вопросы импортозамещения, достойно конкурировать с зарубежными фирмами, производящими высокоточные и надежные датчики и измерительные системы, на мировом рынке измерительной аппаратуры.

Библиографический список

1. Дмитриенко, А. Г. ОАО «НИИФИ» – интеграция технологий космоса и земли / А. Г. Дмитриенко // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 2–4.
2. Николаев, А. В. О новой концепции построения систем аварийной защиты реакторных установок и сейсмомониторинга площадки АЭС / А. В. Николаев, А. Г. Дмитриенко, А. А. Папко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Сер.: Технические науки. – 2012. – № 04 (04). – С. 23–32.
3. Николаев, А. В. Комплексы и системы распределенных сетей интеллектуальных датчиков / А. В. Николаев, В. Н. Новиков, М. В. Тюрин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. Сер.: Технические науки. – 2012. – С. 52–62.
4. Обоснование метода прогнозирования технического состояния систем стартовых и технических комплексов космодрома с использованием мониторинговой информации / А. В. Николаев, А. Г. Дмитриенко, М. Ю. Михеев, М. В. Тюрин, И. Ю. Семочкина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4. – С. 6–12.
5. Стенограмма выступления В. В. Путина на XXI Петербургском экономическом международном форуме 1–3 июня 2017 г. – М., 2017. – 36 с.
6. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации», утв. Председателем правительства Д. А. Медведевым распоряжением от 28 июля 2017 г. – № 1632-р. – 87 с.
7. Стенографический отчет заседания Совета по науке и образованию под председательством В. В. Путина в Кремле (г. Москва, 23.07.2014). – М., 2014. – 24 с.

Николаев Андрей Валерьевич

генеральный директор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Nikolaev Andrey Valer'evich

general director,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 629.78.002.5

Николаев, А. В.

Формирование вопросов кадровой политики АО «НИИФИ» в условиях реализации программы «Цифровая экономика Российской Федерации» / А. В. Николаев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 7–11. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-1.

А. В. Майоров, А. В. Малышев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСТОЧНИКА ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА СИСТЕМУ ИЗМЕРЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДАТЧИКОВ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ТИПА

A. V. Mayorov, A. V. Malyshev

A STUDY OF THE INFLUENCE OF THE VOLTAGE REFERENCE OF THE SYSTEM ABSOLUTE PRESSURE MEASUREMENT BASED ON SENSORS PIEZORESISTIVE TYPE

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Одним из способов повышения метрологических характеристик систем измерения абсолютного давления является усовершенствование источника опорного напряжения (ИОН), входящего в состав вторичного преобразователя системы. С целью улучшения метрологических характеристик системы измерения абсолютного давления разработан ИОН, отличающийся применением полностью отечественной элементной базы. **Материалы и методы.** Авторами были использованы методы исследования, преобразования измерительной информации, математического моделирования и натурные испытания. **Результаты.** Рассмотрена и решена задача улучшения метрологических характеристик системы измерения абсолютного давления путем внедрения разработанного ИОН, построенного полностью на отечественной элементной базе. Экспериментально показано, что разработанный ИОН превосходит зарубежные аналоги по ряду основных метрологических характеристик, кроме того, его внедрение в системы измерения абсолютного давления является целесообразным. **Выводы.** Использование разработанного ИОН во вторичном преобразователе позволяет отказаться от использования зарубежной элементной базы, обеспечить более высокую вероятность безотказной работы и уменьшить влияние дестабилизирующих факторов, таких как нестабильность выходного напряжения по времени, нестабильность выходного напряжения по температуре и т.д., на систему в целом.

A b s t r a c t. Background. One of the ways to improve the metrological characteristics of the measuring systems absolute pressure, is the improvement of the reference voltage (ION), part of the secondary transducer system. With the aim of improving the metrological characteristics of the measurement system absolute pressure developed by ION, characterized by the use of completely domestic components. **Materials and methods.** The Authors used research methods, transformation of measurement data, mathematical modeling and field tests. **Results.** Reviewed and resolved the task of improving the metrological characteristics of the measurement system absolute pressure, by introducing designed ION built completely on domestic element base. It is experimentally shown that the developed ION exceeds the foreign analogues in a number of key metrological characteristics, in addition, its implementation in a system absolute pressure measurement is appropriate. **Conclusions.** The use of the developed ION secondary Converter allows you to refuse the use of foreign element base, provide a higher proba-

bility of failure (FBG) and to reduce the influence of destabilizing factors, such as instability of output voltage in time, the instability of the output voltage according to the temperature etc., the system as a whole.

К л ю ч е в ы е с л о в а: датчик абсолютного давления, погрешность преобразования, вторичный преобразователь, система измерения абсолютного давления.

Key words: sensor, error of conversion, the secondary transducer system for measuring absolute pressure.

Современное развитие специальной техники, к которой относят ракетно-космическую технику, вооружение и военную технику, авиацию, двигателестроение, изделия для атомной энергетики и т.п., во многом зависит от технического уровня информационно-измерительных и управляющих систем [1, 2], качество и технико-экономические показатели которых определяются использованной в них датчиково-преобразующей аппаратурой.

Авторами разработана система измерения абсолютного давления (СИАД), отличающаяся улучшенными метрологическими характеристиками, применением полностью отечественной элементной базы и наличием цифрового токового интерфейса связи. Повышенная надежность разработанной системы обеспечивается наличием трех каналов связи, каждый из которых имеет отдельные первичный и вторичный преобразователи с независимыми внешними интерфейсами связи [3].

Конструктивно и схемотехнически каждый канал связи системы состоит из тензометрического датчика (первичного преобразователя) и вторичного преобразователя, структурная схема приведена на рис. 1.

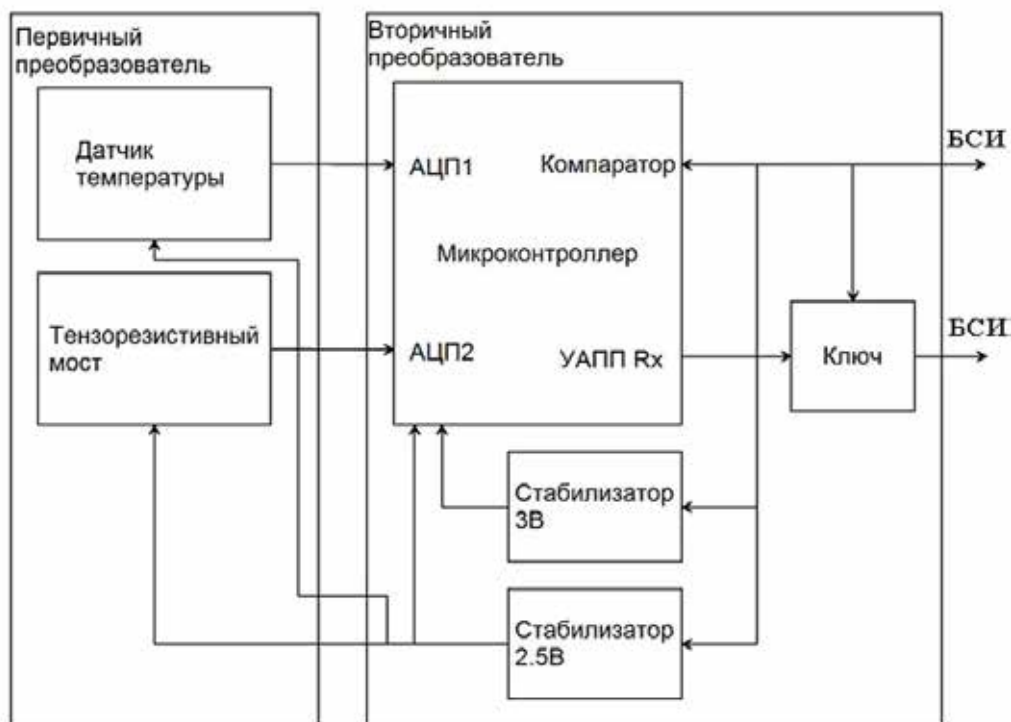


Рис. 1. Структурная схема канала связи системы измерения абсолютного давления

Первичные преобразователи отдельных каналов системы изготовлены в едином технологическом цикле на единой подложке с последующим объединением в единый блок, что позволяет снизить массогабаритные параметры системы и повысить вероятность безотказной работы (ВБР) по сравнению с вариантом изготовления первичных преобразователей в качестве отдельных модулей.

Снижение энергопотребления, а также массогабаритных параметров вторичных преобразователей достигается путем построения их на основе 32-разрядных микроконтроллеров типа 1986BE4У производства АО ПКК «Миландр» (г. Зеленоград). Микроконтроллеры указанного типа построены на основе ядра Cortex M0, благодаря чему имеют низкое энергопотребление (не более 22 мА в активном режиме). Кроме того, они имеют в своем составе аналоговые блоки восьми 24-разрядных сигма-дельта аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с дифференциальными входами, дифференциальные усилители с программируемым коэффициентом усиления, восемь каналов 12-разрядного АЦП последовательного приближения [4].

Выбор указанного типа микроконтроллера позволяет отказаться от использования внешних аналоговых блоков АЦП и инструментальных усилителей, подключив тензорезистивный мост и датчик температуры непосредственно к дифференциальным аналоговым входам, а также снизить общее энергопотребление датчиков и, как следствие, всей СИАД в целом.

Алгоритмы цифровой обработки сигналов, заложенные в программное обеспечение микроконтроллера, реализуют компенсацию составляющих основной погрешности (аддитивная и мультипликативная составляющие, составляющая, обусловленная интегральной нелинейностью) посредством табличного метода. Компенсация температурных погрешностей осуществляется с помощью массива данных, являющегося функцией зависимости от температуры, заданных таблично.

Данные о температуре блока первичных преобразователей поступают на микроконтроллер с датчика температуры резистивного типа, конструктивно размещенного на единой подложке с тензорезистивным мостом.

Коррекция основных и дополнительных погрешностей посредством встроенного программного обеспечения микроконтроллера канала разработанной СИАД позволяет отказаться от настройки системы управления двигателем (в случае использования разработанной авторами СИАД в составе системы управления двигателем) под конкретные датчики. Это позволяет осуществлять замену СИАД без проведения дополнительных операций настройки всей системы управления двигателем, что также повышает ВБР системы управления двигателем ввиду снижения ошибок субъективного характера. Необходимые для осуществления коррекций табличные данные, хранящиеся в памяти микроконтроллера, могут быть рассчитаны самим микроконтроллером при проведении операций настройки и регулировки либо загружены извне посредством цифрового токового интерфейса связи.

Для организации питания цифровой части вторичного преобразователя датчика используется интегральный стабилизатор напряжения на основе микросхемы типа 1334ЕН3.3Т производства ОАО «Воронежский завод полупроводниковых приборов – Сборка» [5]. Выбор вышеуказанного интегрального стабилизатора обусловлен необходимостью получения минимальных массогабаритных параметров. С целью решения известной проблемы повышенного уровня пульсаций выходного напряжения источников подобного типа (серии 78XX, 79XX и аналогичные) выход стабилизатора напряжения дополнительно нагружен на резистор сопротивлением 3,3 КОм. Для стабилизации питания тензорезистивного моста и аналоговых блоков микроконтроллера авторами разработан и применен источник опорного напряжения, фрагмент схемы электрической принципиальной которого приведен на рис. 2. Основой разработанного источника опорного напряжения является термокомпенсированный стабилитрон типа 2С198 [6]. Для задания стабильного тока через стабилитрон использовано токовое зеркало Уилсона [7], построенное на элементах VT1–VT3, R1. Ввиду того, что примененные термокомпенсированные стабилитроны имеют напряжение стабилизации 9,8 В, для задания необходимого уровня напряжения источника использован резистивный делитель лестничного типа на элементах R2, R3, в качестве которых применены полупрецизионные резисторы типа С2-29 [8]. С целью снижения влияния тока потребления на значение выходного напряжения источника применена буферизация посредством прецизионного операционного усилителя типа 140УД17 [9].

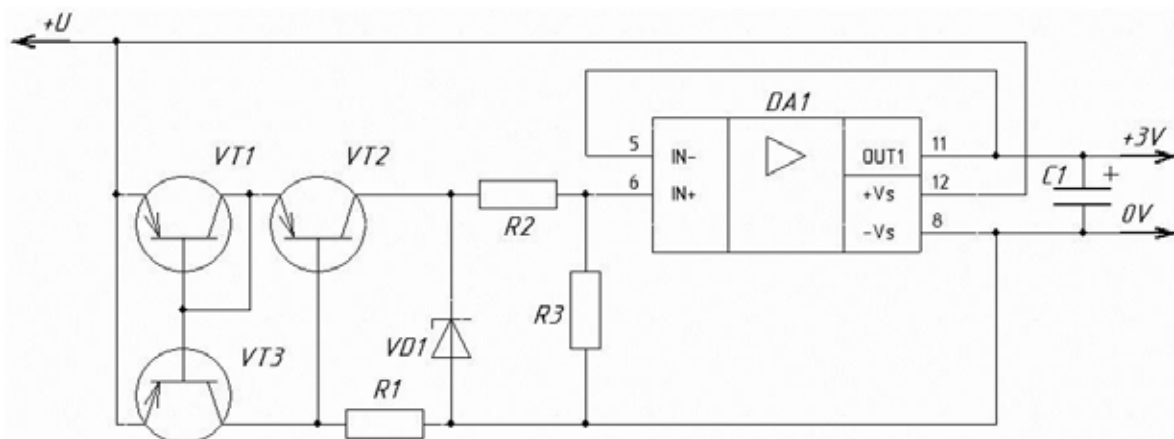


Рис. 2. Фрагмент схемы электрической принципиальной системы, поясняющий принцип построения источника опорного напряжения

Авторами проведена серия экспериментов по определению параметров разработанного источника опорного напряжения. Сравнительные метрологические характеристики разработанного авторами источника опорного напряжения и источников опорного напряжения импортного производства типа AD780, TL431 приведены в табл. 1 [10, 11].

Таблица 1

Сравнение метрологических характеристик разработанного источника опорного напряжения и источников опорного напряжения типа AD780, TL431

Источник опорного напряжения	Разработанный источник опорного напряжения	AD780	TL431
Напряжение стабилизации, В	1–6, задается при настройке	2,5 или 3, фиксированное	2,5
Допуск на номинальное значение выходного напряжения, %	$\pm 0,05$	$\pm 0,2$	$\pm 0,06$
Нестабильность выходного напряжения по времени, ppm/c	± 10	± 20	± 30
Нестабильность выходного напряжения по температуре, ppm/°C	± 2	± 7	± 7
Диапазон рабочих температур, °C	-50 ... +50	-50 ... +50	-50 ... +50
Ток короткого замыкания, mA	10 mA, ограничен типом примененного ОУ	30	30
Диапазон входного напряжения, В	10... 30	4... 36	4...36
Собственный ток потребления, mA	Не более 3	Не более 1.5	Не более 0,5
Максимальный ток нагрузки, mA	Ограничен примененным операционным усилителем	10	10

Применение схемотехнических решений подобного рода при построении источника опорного напряжения продиктовано необходимостью получения высокой стабильности его выходного напряжения как по времени, так и по температуре (при использовании полностью отечественной элементной базы).

Внешний интерфейс связи датчика представляет собой цифровую токовую петлю, которая используется одновременно для питания всех блоков и узлов датчика посредством организации обратной цепи питания. При приеме данных для детектирования уровней на линии используется встроенный компаратор микроконтроллера, подключенный к линии посредством резистивного делителя лестничного типа.

К выходу приемопередатчика подключен электронный ключ на биполярном транзисторе типа 2Т3130А9 [12] с последовательно включенным источником тока, который необходим для задания необходимых уровней тока на линии при передаче.

Внедрение разработанного источника опорного напряжения в систему измерения абсолютного давления на основе датчиков тензорезистивного типа позволяет улучшить выходные параметры информационно-измерительной системы в целом.

Разработанный авторами ИОН отличается от существующих аналогов улучшенными метрологическими характеристиками и применением полностью отечественной элементной базы. Проведенная серия экспериментов доказывает, что разработанный ИОН может быть использован для построения систем подобного рода и является хорошей заменой известных аналогов зарубежного производства.

Библиографический список

1. Дмитриенко, А. Г. Тенденции развития датчиков, преобразователей и на их основе систем измерения, мониторинга и контроля технически сложных объектов ракетно-космической техники / А. Г. Дмитриенко, А. В. Блинов, А. Н. Трофимов, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 4–6.
2. Дмитриенко, А. Г. Разработка унифицированных конструкций датчиков для перспективных систем измерения и контроля специальной техники / А. Г. Дмитриенко, А. Н. Трофимов, А. А. Трофимов // Измерительная техника. – 2010. – № 10. – С. 19–22.
3. О правительственной комиссии по импортозамещению: постановление Правительства РФ от 4 августа 2015г. № 785. – URL: <http://zimport.ru/it/>
4. Спецификация на микроконтроллеры серии 1986BE4. – URL: <http://www.milandr.ru/index.php?mact=Products,cntnt01,details,0&cntnt01productid=275&cntnt01returnid=68>
5. Москатов, Е. А. Справочник по полупроводниковым приборам / Е. А. Москатов. – 2-е изд. – Таганрог, 2005. – 219 с.
6. Спецификация на прецизионные термокомпенсированные стабилитроны типа 2С198. – URL: <http://www.nzpp.ru/product/page23.php>
7. Хоровиц, П. Искусство схемотехники : в 3 т. : пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. – 3-е изд., стереотип. – М. : Мир, 1993. – Т. 1. – 413 с.
8. ГОСТ 29035–91. Постоянные резисторы для электронной аппаратуры. – М., 1991.
9. Спецификация на прецизионный операционный усилитель типа 140УД17. – URL: <http://www.voshod-krlz.ru/files/datasheets/K140UD17A.pdf>
10. Спецификация на источник опорного напряжения импортного производства типа AD780. – URL: <http://www.kontest.ru/catalog/item/249241>
11. Спецификация на источник опорного напряжения импортного производства типа TL431. – URL: <http://www.joyta.ru/4883-primenenie-reguliruemogo-stabilitrona-tl431/>
12. Спецификация на транзистор типа 2Т3130А9. URL: <http://www.eandc.ru/catalog/detail.php?ID=17968>

Майоров Артем Вячеславович

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: niifi@sura.ru

Mayorov Artyom Vyacheslavovich

design engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Мальшев Андрей Владимирович

инженер-регулирующий,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: niifi@sura.ru

Malyshev Andrey Vladimirovich

operator,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 621.317.3

Майоров, А. В.

Исследование влияния источника опорного напряжения на систему измерения абсолютного давления на основе датчиков тензорезистивного типа / А. В. Майоров, А. В. Малышев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 12–17. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-2.

К. И. Бастрыгин, А. А. Трофимов

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ, МОНИТОРИНГА, КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

K. I. Bastrygin, A. A. Trofimov

THE MEASUREMENT SYSTEM, MONITORING, CONTROL AND DIAGNOSTICS PARAMETERS OF THE ROCKET ENGINE

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Актуальность данной темы подтверждается повышенными требованиями к надежности, предъявляемыми к жидкостным ракетным двигателям. Основной целью разработки системы является решение ряда задач: увеличение номенклатуры датчиков и перечня измеряемых ими параметров, снижение стоимости и массогабаритных параметров системы, увеличение площади и количества контролируемых объектов, автоматизация процедур накопления, систематизация и классификация статистических данных огневых испытаний узлов и агрегатов двигателя. *Материалы и методы.* Изложены особенности построения системы измерения и мониторинга. Приведены схемотехнические решения и описаны принципы работы системы. Разработан алгоритм информационного взаимодействия блока сбора данных и цифровых датчиков. *Результаты.* Разработанный макет системы измерения, мониторинга, контроля и диагностики двигателя при огневых стендовых испытаниях состоит из распределенной сети датчиков физических величин (ДФВ), измеряющих физические параметры двигателя, и блока сбора данных, обеспечивающего подключение ДФВ, непрерывный или систематический сбор и обработку сигналов, передаваемых по измерительным каналам с датчиков, и передачу обработанных. *Выводы.* По результатам исследования проведено сравнение разработанной системы с применяемой для аналогичных целей в настоящее время и сделан вывод о значительном превосходстве первой, что в дальнейшем должно обеспечить более высокую надежность и безопасность при создании, отработке и запуске ракетносителей.

A b s t r a c t. *Background.* The relevance of this topic is confirmed by the high requirements to reliability requirements to a liquid-propellant rocket engines. Main design goal of the system is the number of tasks: increasing the range of sensors and list their measured parameters, cost reduction and mass-dimensional parameters of the system, increasing the area and number of monitored objects, the automation of procedures for the accumulation, systematization and classification of statistical data of fire tests components and assemblies of the engine. *Materials and methods.* Peculiarities of construction of measuring and monitoring systems. Showing circuit solutions, and describes the principles of operation of the system. The algorithm of information interaction of data acquisition unit and digital sensors. *Results.* Designed project of the system of measurement, monitoring, control and diagnostics of the engine at fire test bench consists of a distributed network of sensors of physical quantities (DFV), which measure the physical parameters of the engine, and block data collection, providing connection DFV, continuous or systematic collection and processing of the signals transmitted by measuring channels with sensors and transmitting the processed signals through the channel «Ether-

net» connection to the higher level system. **Conclusions.** According to the research results a comparison of the developed system used for the same purposes at the present time and concludes that there is significant superiority of the first that should ensure higher reliability and safety in creating, testing and launching rockets.

К л ю ч е в ы е с л о в а: система измерения параметров жидкостного ракетного двигателя, датчики, блок сбора данных, цифровой выход.

Key words: the system of measurement of parameters of liquid rocket engine, sensors, a data collection unit, digital output.

Безаварийность жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) и проблема обеспечения сохранности дорогостоящих наземных сооружений (стендов и стартовых устройств) при испытаниях является одной из важнейших задач. Безаварийность функционирования ЖРД во многом определяется надежностью двигателей, которая, в свою очередь, обеспечивается многократными испытаниями двигателя на стенде в процессе отработки, и высокой эффективностью применяемых систем аварийной защиты и диагностики, обладающих высоким уровнем надежности и обеспечивающих реализацию наилучших технических характеристик ЖРД при наименьших экономических затратах [1].

В настоящее время к системам функциональной диагностики двигателя предъявляются следующие требования:

- комплексная автоматизация процессов огневых стендовых испытаний;
- простота в управлении при практической эксплуатации в условиях сложной обработки диагностической информации;
- применение цифровых информационных технологий, универсальных алгоритмов и быстродействующей аппаратуры;
- автоматизация процедур накопления, систематизации и классификации статистических данных огневых испытаний узлов, агрегатов и двигателя в целом;
- минимальная масса системы [2, 3].

Системы измерения, мониторинга, контроля и диагностики двигателя при огневых стендовых испытаниях позволяют провести комплексную автоматизацию процессов испытаний, снизить число отказов, приходящихся на двигательные установки при аварийных пусках ракет с жидкостными двигателями, сократить масштаб разрушений самого двигателя и стенда в случае аварий, расширить возможности анализа причин аварий при сохранении конструкций двигателей, обеспечив, в итоге, повышение уровня надежности и безопасности при создании, отработке и запуске ракет-носителей [4].

Разработанный в АО «НИИФИ» макет системы измерения, мониторинга, контроля и диагностики двигателя при огневых стендовых испытаниях (рис. 1) состоит из распределенной сети датчиков физических величин (ДФВ), измеряющих физические параметры двигателя, и блока сбора данных, обеспечивающего подключение ДФВ, непрерывный или систематический сбор и обработку сигналов, передаваемых по измерительным каналам с датчиков, и передачу обработанных сигналов по каналу связи Ethernet в систему верхнего уровня.

Максимальное количество аналоговых датчиков:

- 416 шт. со встроенными усилителями и частотным выходом;
- 104 шт. на основе тензомостов;
- 208 шт. на основе термоэлектрических преобразователей и термопреобразователей сопротивления;
- 208 шт. пьезодатчиков;
- 208 шт. со встроенными усилителями и синхронизацией.

Работа программно-алгоритмического обеспечения системы мониторинга ЖРД состоит из двух основных этапов:

- 1) установка соединения с входными и выходным интерфейсами (поиск и открытие портов, установка Ethernet-соединения с персонального компьютера (ПК));
- 2) опрос датчиков и передача данных в систему верхнего уровня.

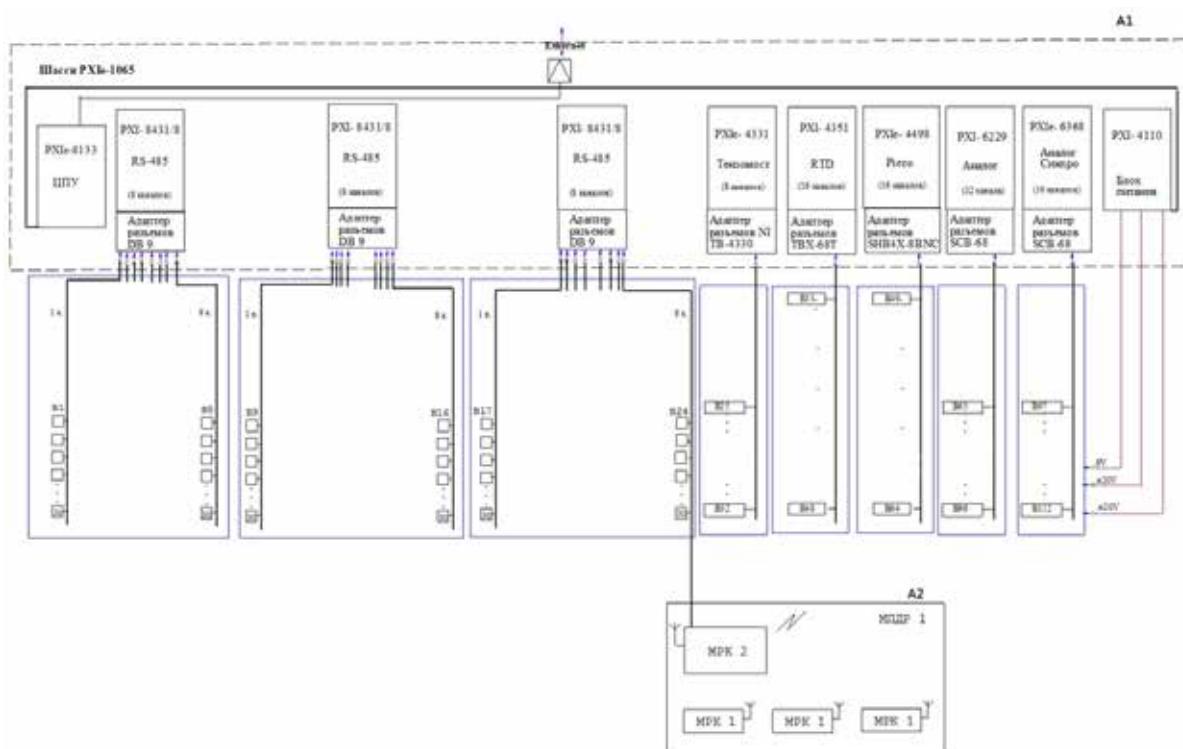


Рис. 1. Структурная схема системы:

A1 – блок сбора данных (БСД); A2 – модуль передачи данных с радиоканалом, состоящий из трех модулей с радиоканалом МРК 1 и одного модуля с радиоканалом МРК 2, предназначенный для преобразования и передачи по радиоканалу выходных сигналов цифровых датчиков, приема и обработки радиосигналов, формирования и передачи пакета данных по интерфейсу RS-485 (максимальное количество цифровых ДФВ с выходным интерфейсом RS 485, передающих выходные данные по радиоканалу – 100 шт.); B1...B24 – цифровые ДФВ с выходным интерфейсом RS 485, передающие данные по кабельным линиям связи (максимальное количество цифровых датчиков – 744 шт.); B25...B112 – аналоговые ДФВ

Опрос датчиков и передача данных в систему верхнего уровня реализуется с помощью механизма обмена сообщениями с датчиками. Для этого предусмотрено использование таймера, генерирующего сообщения для датчиков и использующее событие по приходу сообщения на входной буфер порта.

Обмен сообщениями подразумевает следующие этапы (рис. 2):

- идентификацию подключенных датчиков;
- запрос паспортных данных датчиков;
- задание сегментных номеров датчикам;
- запрос данных от датчиков.

После прохождения вышеперечисленных этапов полученные данные группируются в посылку и передаются на Ethernet-порт [5].

Для подключения требуемого количества аналоговых датчиков в состав БСД должны вводиться дополнительные измерительные модули, количество которых должно соответствовать следующей формуле:

$$N_{\text{мол}} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5, \quad (1)$$

где N_1 – количество модулей для подключения датчиков со встроенными усилителями и частотным выходом; N_2 – количество модулей для подключения датчиков на основе тензостов; N_3 – количество модулей для подключения датчиков на основе терморезисторов сопротивления и термоэлектрических преобразователей; N_4 – количество модулей для подключения пьезоэлектрических датчиков; N_5 – количество модулей для подключения датчиков со встроенными усилителями и синхронизацией.



Рис. 2. Протокол информационного взаимодействия БСД с датчиками

Максимальное количество измерительных модулей в составе БСД для подключения аналоговых датчиков равно 13.

Максимальное количество подключаемых аналоговых датчиков рассчитывается по формуле

$$N_{\text{датч}} = N_{\text{мод}} \cdot k, \quad (2)$$

где $N_{\text{мод}}$ – количество измерительных модулей требуемого типа; k – количество каналов измерительного модуля.

Для работы с системой мониторинга ЖРД разработано специализированное программное обеспечение (ПО) для ПК. После первого запуска ПО и начала работы требуется ввести во всплывающее окно: «Тип датчика», «Год изготовления», «Поддиапазон номеров» и т.д. В случае успешного обнаружения датчиков с заданными параметрами цвет поля «Наличие датчика» становится зеленым и в поле отображается символ ✓. Во время испытаний на экран ПЭВМ выводится информация о текущих показаниях датчиков (рис. 3).

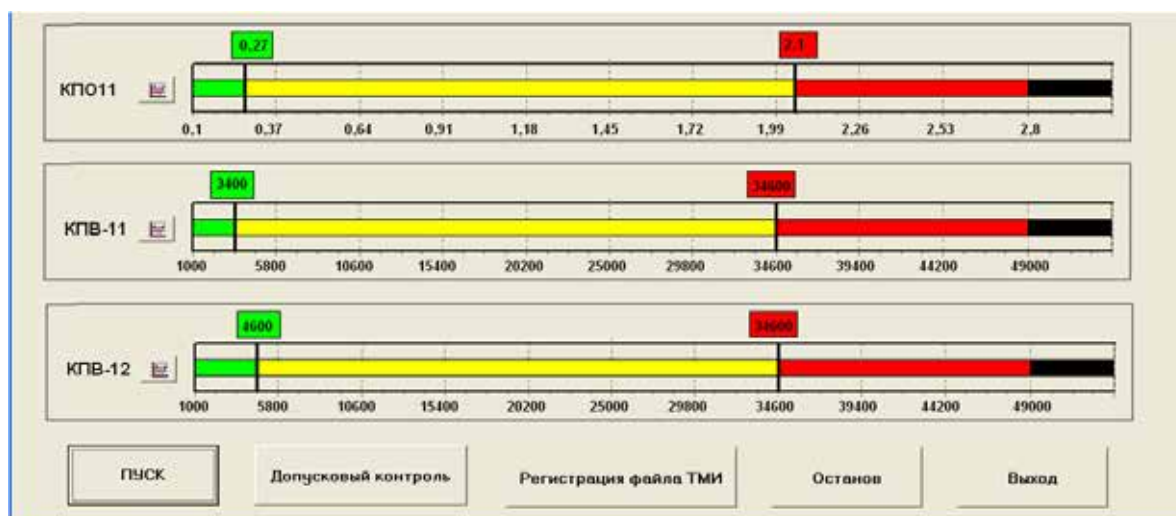


Рис. 3. Окно «Результаты испытаний»

По результатам испытаний выводится диалоговое окно «Результаты допускового контроля» (рис. 4) позволяющее получить информацию о всех показаниях датчиков в системе. Запись результатов испытаний в виде графиков начинается с момента включения системы ЖРД и хранится в памяти ПЭВМ на протяжении всего цикла ее эксплуатации.

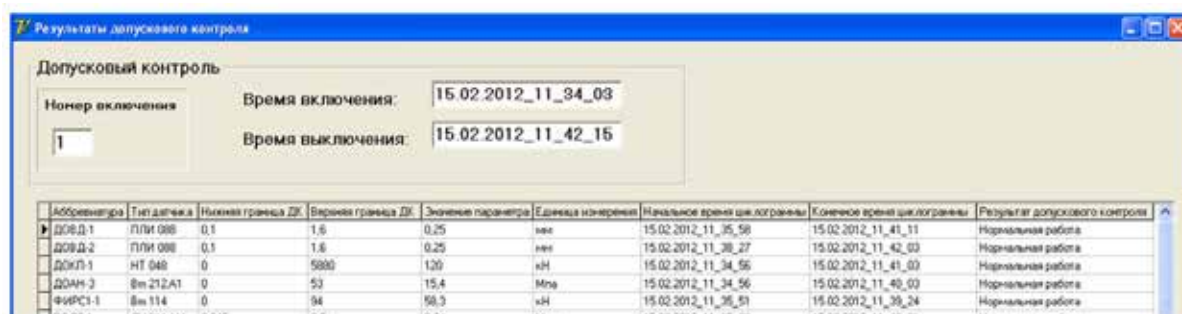


Рис. 4. Окно «Результаты допускового контроля»

Разработанная система обладает улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками:

1. Широкая номенклатура датчиков и обширный перечень измеряемых параметров обеспечивают достоверность описания физических процессов двигателя и формирование полной совокупности измерительной информации, необходимой для функциональной диагностики технического состояния двигателя.

2. Применение модуля передачи данных с радиоканалом позволяет:

- снизить стоимость и массогабаритные параметры системы, повысить надежность передачи данных за счет передачи результатов измерений датчиков физических величин по беспроводному каналу на расстояние до 50 м;

- увеличить площади и количество контролируемых объектов за счет большого числа каналов передачи данных – до 100;

- увеличить производительность системы за счет большой скорости передачи данных.

3. Построение системы на основе измерительных модулей PXI компании National Instruments, обладающих высокой производительностью, обеспечивает возможность работы в режиме реального времени, регистрацию данных при многоканальных измерениях электрических сигналов, характеризующихся широкими динамическими и частотными диапазонами, сложной формой и высокой точностью измерений, а также легкость управления большим количеством датчиков и конфигурирование информационных каналов из интегрированной программной среды LabView [6, 7].

4. Метрологический диагностический самоконтроль, реализуемый за счет входящих в состав системы цифровых датчиков и специального программно-алгоритмического обеспечения, обеспечивает самодиагностику состояния системы, повышая в дальнейшем надежность и достоверность диагностики состояния двигателя.

5. Применение и разработка новых цифровых датчиков позволяют получить полную и достоверную информацию о техническом состоянии двигателя. Так как применяемые в настоящий момент датчики избыточного давления имеют низкие показатели вибропрочности и термоустойчивости, при работе двигателя могут проявляться:

- обрывы электрических цепей датчика в зоне чувствительного элемента или в месте заделки кабельной перемычки в консольную часть корпуса датчика, приводящие к потере измерительной информации;

- разрушение сварного шва в верхней части корпуса датчика (без потери герметичности и без обрыва электрической цепи);

- несанкционированные уходы выходного сигнала датчика, приводящие к увеличению погрешности измерения вследствие различного рода температурных воздействий (паразитные термоЭДС; неразгруженные температурные деформации на конструкции его чувствительного элемента со стороны контролируемой или окружающей среды; температурное воздействие со стороны подводящих проводов, проявляющееся под воздействием виброперемещений, а так-

же предварительно захоложенных конструкций корпуса и кабельной перемычки датчика после начала работы двигателя). Требуется переход на новую модификацию датчиков избыточного давления, имеющих уменьшенную угловую конструкцию корпуса в зоне заделки кабельной перемычки и новую конструкцию чувствительного элемента [8].

Термометры сопротивления, устанавливаемые в настоящее время на агрегатах двигателя, отличающиеся высокой вибронапряженностью, не обеспечивают требования по вибрационным воздействиям. Из-за этого происходит их отказ в части обрыва электрической цепи в зоне чувствительного элемента на первом или втором цикле работы. Многолетние исследования в направлении увеличения ресурса работы данных конструкций существенных положительных результатов не дали. В то же время получен положительный опыт их создания на базе технологий с применением термокабеля, что позволило, в частности, создать высоконадежную для жестких условий эксплуатации термопару ТТ249 с повышенными габаритными размерами. В настоящее время есть все основания и гарантированный задел для создания нового аналога, но с габаритными размерами, соответствующими термопарам ТТ135 и ТТ142 [8, 9].

Пьезоэлектрические датчики, применяемые в существующей системе, имеют сравнительно большие геометрические размеры, значительный диаметр сквозного отверстия ($\varnothing 12$ мм) внутри агрегата двигателя, снижающий показатели механической надежности конструкции, а также не способствующий смещению спектра собственных частот датчика в сторону повышения их значений. Также имеются замечания по помехозащищенности. В разрабатываемой системе применен вновь разработанный высокотемпературный пьезоэлектрический датчик с чувствительным элементом, выполненным из пьезоэлементов на основе монокристаллического галлотантала лантана (лангатат – ГТЛ), позволяющим увеличить диапазон измерения быстропеременных давлений, воздействия статических давлений, частотный диапазон, стойкость к вибрационным ускорениям и снизить погрешность [8, 10, 11].

6. Широкий набор функций обработки данных о параметрах или деятельности двигательной установки позволяет получать разнообразную, прошедшую специальную обработку информацию, необходимую для проведения расширенного анализа технического состояния двигателя с целью выявления технических неисправностей и нарушений технологических процессов его функционирования.

7. Дружественный интерфейс отображения информации обеспечивает обслуживающий персонал наиболее полной информацией о параметрах или деятельности двигательной установки, технических неисправностях и нарушениях технологических процессов функционирования двигательной установки, при этом обслуживающий персонал имеет возможность настройки отображения измерительной информации, а количество терминалов отображения ограничивается только отсутствием нужного количества сетевой аппаратуры и компьютеров.

8. Хранение всей совокупности информации, получаемой в результате применения системы для функциональной диагностики двигателей при проведении огневых стендовых испытаний, обеспечивает обслуживающий персонал полной и достоверной информацией в случае необходимости, находит свое применение для предотвращения угрозы возникновения критических ситуаций и аварий, а также используется в соответствующих центрах системного мониторинга и оперативного управления.

9. Передача данных по скоростной сети Ethernet (не менее 1 Гбит/с) обеспечивает высокую скорость передачи данных и сопряжение как с существующими, так и с перспективными системами хранения данных [12].

Для сравнения в табл. 1 приведены основные технические характеристики разрабатываемой системы и системы функциональной диагностики ЖРД, применяемой в настоящее время [4].

Разработанная система значительно превосходит отечественный аналог по максимальному количеству аналоговых и цифровых измерительных каналов и цифровых датчиков, что позволит проводить комплексную автоматизацию процессов огневых стендовых испытаний, снизить число отказов, приходящихся на двигательные установки при аварийных пусках ракет с жидкостными двигателями, сократить масштаб разрушений самого двигателя и стенда в случае аварий, расширить возможности анализа причин аварий при сохранении конструкций двигателей, обеспечив в итоге повышение уровня надежности и безопасности при создании, отработке и запуске ракет-носителей.

Таблица 1

Сравнительные технические характеристики систем мониторинга и диагностики

Наименование параметра	Разработанная система мониторинга, контроля и диагностики двигателя при огневых стендовых испытаниях АО «НИИФИ»	Система функциональной диагностики ЖРД, применяемая в настоящее время
Количество цифровых каналов	24	—
Максимальное количество цифровых датчиков	744	—
Максимальное количество аналоговых датчиков со встроенными усилителями и частотным выходом	416	337
Максимальное количество аналоговых датчиков на основе тензомостов	104	34
Максимальное количество аналоговых датчиков на основе термоэлектрических преобразователей	104	—
Максимальное количество аналоговых датчиков термопреобразователей сопротивления	104	128
Максимальное количество аналоговых датчиков пьезодатчиков	208	44

Библиографический список

1. Ягодников, Д. А. Исследование внутрикамерных характеристик и моделирование циклограммы работы ракетных двигателей малой тяги с использованием ЭВМ : метод. указания к лабораторным работам / Д. А. Ягодников, А. Р. Полянский, Д. Ю. Эдин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 48 с.
2. Кочетков, Ю. Н. Методика определения энергетических характеристик ЖРДМТ / Ю. Н. Кочетков, Г. Я. Савельев, В. Н. Аверкина // Ракетно-космическая техника : науч.-техн. сб. НИИТП. – Вып. № 3 (136). – М. : Изд-во НИИТП, 1992. – С. 9–13.
3. Дмитриенко, А. Г. Тенденции развития датчиковой аппаратуры и систем измерения, мониторинга, контроля и диагностики технически сложных объектов на ее основе / А. Г. Дмитриенко, В. И. Волчихин, А. В. Блинов, Е. А. Ломтев // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 2 – С. 6–12.
4. Беляев, Е. Н. Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей : учеб. пособие / Е. Н. Беляев, В. К. Чванов, В. В. Черваков. – М. : МАИ, 1999. – 228 с.
5. Тревис, Д. LabView для всех / Джеффри Тревис ; пер. с англ. Н. А. Клушина. – М. : ДМК пресс, 2005. – 544 с.
6. Катков, А. Н. Структура системы диагностики двигательной установки для огневых и стендовых испытаний / А. Н. Катков, В. Н. Новиков // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 47.
7. Бутырин, П. А. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7 (30 лекций) / П. А. Бутырин, Т. А. Васьковская, В. В. Каратаев. – М. : ДМК пресс, 2005. – 264 с.
8. Левочкин, П. С. Проблемы функциональной диагностики жидкостных ракетных двигателей / П. С. Левочкин, Д. С. Мартиросов, В. Т. Буканов // Вестник Московского государственного университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. – 2013. – № 1 (90). – 72 с.
9. Сайт фирмы АО «НПО ИТ». – URL: www.npoit.ru.
10. Бастрыгин, К. И. Высокотемпературный пьезоэлектрический датчик пульсации давления / К. И. Бастрыгин // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1 (15). – С. 76–81.
11. Бастрыгин, К. И. Исследования температурной стабильности кристаллов для создания высокотемпературных пьезоэлектрических датчиков динамического давления / К. И. Бастрыгин, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2015. – № 11. – С. 56–59.
12. Григорьев, В. А. Сети и системы радиодоступа / В. А. Григорьев, О. И. Лагутенко, Ю. А. Распаев. – М. : Экотрендз, 2005. – 384 с.

Бастрыгин Кирилл Игоревич

начальник лаборатории,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: nik2@niifi.ru

Bastrygin Kirill Igorevich

head of laboratory,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Трофимов Алексей Анатольевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Trofimov Alexei Anatol'evich

doctor of technical science, professor,
sub-department of information and measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 629.7.018.036.5

Бастрыгин, К. И.

Система измерения, мониторинга, контроля и диагностики параметров ракетного двигателя / К. И. Бастрыгин, А. А. Трофимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 18–25. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-3.

Ю. Н. Косников

ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ИНТЕРФЕЙСНОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ ВИЗУАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Y. N. Kosnikov

ORGANIZATIONAL OPTIMIZATION OF THE INTERFACE SPACE FOR VISUAL MONITORING OF MULTI-PARAMETRIC OBJECTS

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является интерфейс «человек–компьютер» системы мониторинга сложных объектов. Предметом исследования является организация интерфейсного пространства. Целью работы является разработка решений по снижению психофизиологической напряженности оператора системы мониторинга путем оптимизации интерфейсного пространства. *Материалы и методы.* Применены методы системного анализа: стратификация рассмотрения интерфейсного пространства и декомпозиция его структуры. Интегральное состояние объекта контроля отображается на основе генерализации его параметров. *Результаты.* Сформулированы принципы организации интерфейса: эргономичность, комплексность, иерархичность, объектная направленность, когнитивность и минимизация вычислительных ресурсов. Генерализация параметров контролируемых объектов позволяет сопоставить состояние их совокупности некоторому хорошо опознаваемому человеком геометрическому образу. Для нижнего уровня подходит интерфейс, содержащий реалистичные образы элементов пространства и дополненный символьными и геометрическими элементами. Иерархический интерфейс позволяет выполнять с требуемой детальностью контроль ситуации на объекте в целом и его элементов в отдельности. Для экономии вычислительных ресурсов следует применить древовидную структуру интерфейсного пространства. В зависимости от ситуации нужно выбирать ту или иную ветвь дерева и тот или иной уровень иерархии на этой ветви. *Выводы.* Предлагаемый подход к распределению информации о контролируемых параметрах между уровнями иерархии интерфейса, а также к выбору элементов интерфейсного пространства позволяет снизить психофизиологическую напряженность оператора системы мониторинга без потери когнитивности.

A b s t r a c t. *Background.* An object of a research is the human/computer interface of an monitoring system of complex objects. An object of research is the organization of the interface space. The work purpose – to reduce the psychophysiological tension of the operator by optimization of the interface space. *Materials and methods.* Methods of systems analysis are applied: stratification of reviewing of the interface space and decomposition of its structure. The integral status of a monitored object is displayed on the basis of parameters generalization. *Results.* The principles of the organization of the interface space are formulated: ergonomics, complexity, hierarchy, object orientation, cognitive level and minimization of computing resources. Generalization of parameters of monitored objects allows to compare a status of their set to some geometrical image which is well identified by the person. The interface containing

realistic images of space elements and added by character and geometrical elements is suitable for the bottom level. The hierarchical interface allows to execute with required detail monitoring of a situation on an object in general and its elements separately. It is necessary to apply a tree structure of the interface space to saving of computing resources. Depending on a situation it is necessary to select this or that branching line and this or that level of hierarchy on this branch. **Conclusion.** The offered approach to distribution of information on controlled parameters between interface levels, and also to a choice of elements of the interface space allows to reduce psychophysiological strength of the operator of a monitoring system without loss of a situation understanding.

К л ю ч е в ы е с л о в а: человеко-машинный интерфейс, мониторинг, когнитивность, иерархическая структура, древовидная структура, интегральное представление, мнемоническое представление, детальное представление.

Key words: human machine interface, monitoring, cognitive level, hierarchical structure, tree structure, integral representation, mnemonic representation, detail representation.

Введение

Компьютерная система управления, как правило, контролирует характеристики множества различных объектов и представляет собой многопараметрическую систему, функционирующую в режиме реального времени (РВ) [1]. Человек-оператор – неустраняемый элемент такой системы, в связи с чем ее важным компонентом является интерфейс «человек–компьютер». В настоящее время действует тенденция перехода к 3D-интерфейсам и интерфейсам виртуального окружения [2]. Это означает, что оператору представляется интерфейсное пространство, которое следует проектировать по определенным законам. От уровня заложенных в интерфейс организационных решений зависит эффективность работы оператора.

Принципы организации интерфейсного пространства

Можно выделить следующие концептуальные принципы организации интерфейсного пространства [3]: эргономичность, комплексность, иерархичность, объектная направленность, когнитивность и экономичность. Принцип эргономичности предписывает выбирать организацию интерфейсного пространства и его оформление таким образом, чтобы максимально снизить психофизиологическую напряженность человека в процессе решения им профессиональных задач. Принцип комплексности учитывает, что к интерфейсу предъявляются разноплановые требования, для удовлетворения которых в интерфейсном пространстве должны сочетаться элементы виртуальной реальности и традиционные средства инженерно-психологического кодирования (текст, цвет, формуляры, мнемосимволы и пр.), отображение результатов решения задач мониторинга в режиме РВ и с некоторой временной задержкой. Объектная направленность интерфейса выражается в том, что в интерфейсном пространстве выделяются сущности, комплексно характеризующиеся геометрическими, визуальными и поведенческими свойствами. Для управления ими создается соответствующая группа методов. Иерархичность (многоуровневость) интерфейса позволяет снять противоречивость требований по детальности представления информации в случае необходимости контроля ситуации в целом и объектов мониторинга в отдельности. Для решения каждой прикладной задачи оператор должен иметь возможность выбрать подходящий уровень иерархии интерфейса. Принцип когнитивности ориентирует разработчиков интерфейса не на создание раскрашенных картинок, а на доставку оператору знания о состоянии контролируемых объектов. Именно эта цель обуславливает выбор геометрических форм, текстур, особенностей поведения и дополнительных элементов объектов интерфейсного пространства. Наконец, принцип экономичности учитывает, что формирование интерфейса не является единственной задачей системы мониторинга, следовательно, расход компьютерных ресурсов, потребных для отображения интерфейсного пространства, следует минимизировать. Следует подробнее остановиться на подходах к реализации принципов иерархичности и экономичности, так как они весьма важны, а однозначных решений для них не существует.

Интегральное и детальное представление состояния объектов мониторинга

Очевидным решением организации иерархии уровней интерфейсного пространства является сопоставление их уровням когнитивности. При построении интерфейса многопараметрической системы мониторинга верхний уровень должен представлять информацию о состоянии совокупности объектов контроля в целом, средние уровни – о состоянии групп таких объектов, а нижний уровень – о состоянии отдельных объектов контроля, включая количественные значения их параметров. Применить одинаковые организационные решения на всех уровнях иерархии невозможно в силу различия привязанных к ним уровней когнитивности.

Понимание состояния всей совокупности объектов контроля в целом следует формировать у оператора путем генерализации параметров объектов. Под генерализацией понимается обобщение первичного множества параметров и выделение (или синтез) таких характеристик, которые позволяют судить о существенных признаках поведения всего исходного множества параметров. Генерализованная характеристика объектов контроля представляется человеку средствами интегральной индикации и реализуется с помощью инструментов 2D- и 3D-компьютерной графики. В зависимости от количества контролируемых объектов и параметров их интегральное представление может быть организовано более или менее сложно.

Простой формой индикации является круговая диаграмма нормализованных параметров контролируемых объектов [4]. Величины параметров приводятся к оптимальным значениям и сопоставляются с секторами круговой диаграммы. При оптимальном состоянии всех параметров диаграмма представляет собой круг. При отклонении параметров от оптимума возникает ступенчатое различие секторов, что одновременно различается глазом человека. Для увеличения информационной емкости индикатора круговую диаграмму можно заменить на «шаровую», т.е. представлять оператору плавно вращающийся шар, секторы которого сопоставляются параметрам объектов контроля.

Другой формой генерализации является сопоставление состояния совокупности объектов контроля некоторому геометрическому образу. Изменения его формы и структуры несут информацию об изменениях совокупности объектов или их отдельных групп. Для повышения эффективности работы оператора геометрический образ и его изменения должны уверенно опознаваться человеком. Примерами могут служить интегральный образ системы «Коналог», разработанный еще в семидесятые годы прошлого века [5], и так называемая обобщенная мнемосхема, применяемая на пульте оператора атомной электростанции [6].

Для повышения информационной емкости интерфейса в качестве интегрального индикатора применяются хорошо знакомые человеку образы, изменения которых он легко опознает. К их числу можно отнести образы природы, например изображения пейзажа или дерева. Их состояния (штиль – волнение – буря, расцвет – плодоношение – увядание) сопоставляются с различными состояниями совокупности контролируемых объектов. Обучение оператора позволяет ему уверенно различать градации состояния объектов по таким образам.

Весьма информативным интегральным индикатором является так называемое «Лицо Чернова» [7]. Это образ человеческого лица, состояние характерных элементов которого (бровей, глаз, носа, рта, ушей) сопоставляется с группами контролируемых параметров. При изменении параметров лицо «гримасничает», и эти гримасы уверенно распознаются человеком. Внедрение такой формы индикации сдерживалось некоторой несерьезностью образа, походившего на детский рисунок, но, тем не менее, она нашла применение в ряде программных пакетов (например, [8]).

В настоящее время уровень развития компьютерной техники позволяет перейти от стилизованного лица к объемному реалистичному образу – «голове Чернова». Существуют программные пакеты, формирующие 3D-модели головы человека по его фотографии [9, 10]. Другим путем моделирования головы человека является применение технологии покадровой реконструкции 3D-модели на основе видеопоследовательности. Эту технологию разработали специалисты Вашингтонского университета [11]. Названными инструментами можно создать и сохранить в памяти компьютера образы, соответствующие различным градациям состояния объектов контроля. Создается набор (библиотека) образов с различными сочетаниями форм и размеров элементов головы. При изменении состояния объектов из библиотеки будет выбран

и предъявлен оператору соответствующий образ. В результате изменения образов происходят дискретно, что хорошо различается человеком.

Альтернативным приемом является управление формой 3D-модели головы в режиме RV. Модель создается в виде полигональной сетки, расположение вершин которой определяет форму и размеры элементов головы. Для управления ими нужно выявить отвечающие за это вершины, определить направления их перемещения, выявить количественные зависимости формы и размеров от состояния групп параметров, разработать процедуры управления. Этот вариант является алгоритмически сложным, но экономит память компьютера.

Нижний уровень иерархии интерфейса несет детальную информацию о состоянии объектов мониторинга. В связи с большой информативной насыщенностью реализация этого уровня должна быть максимально эргономичной. В реальном мире человек живет и действует в 3D-пространстве, поэтому интерфейс, построенный по его законам, является наиболее эффективным. В то же время задача интерфейса – не погрузить человека в виртуальное реалистичное жизненное пространство, а оперативно дать верное представление о состоянии объектов. Для этого подходит интерфейс, содержащий реалистичные образы элементов пространства и дополненный символическими и геометрическими элементами (надписями, шкалами, пиктограммами, указателями и пр.).

Функции и изобразительные решения средних уровней иерархии интерфейса определяются принятой структуризацией информации о контролируемых объектах. Элементы интерфейса на средних уровнях, с одной стороны, должны указывать на конкретные группы контролируемых параметров, а с другой – отражать интегральное состояние этих групп с целью оперативного восприятия их состояния.

Древовидная организация интерфейсного пространства

По мере опускания по уровням иерархии количество и детальность отображаемых параметров растут. Параллельное представление всех параметров в какой бы то ни было форме требует больших вычислительных затрат, что противоречит принципу экономии ресурсов. Для его выполнения следует применить древовидную организацию интерфейсного пространства и в зависимости от ситуации выбирать ту или иную ветвь дерева и тот или иной уровень иерархии на этой ветви. В таком случае одновременно отображаемая часть интерфейсного пространства относится к одному узлу дерева и содержит ограниченный набор элементов. Управление движением по ветвям дерева может быть различным: определяться оператором (вызывные элементы интерфейса), системой мониторинга (например, по сигналу выхода параметров за границы допустимых значений) или и оператором и системой мониторинга – комбинированное управление. В последнем случае система мониторинга предъявляет проблемный блок параметров, а оператор, используя свои знания и опыт, осуществляет выбор элементов отображения или управления.

В качестве примера на рис. 1 схематично показан иерархический интерфейс многопараметрической системы контроля.

Верхний уровень интерфейса представлен интегральной индикацией состояния объекта контроля в виде эволюций модели человеческого лица (показаны три фазы эволюции). Выражение лица, соответствующее ухудшению параметров объекта, заставляет оператора обратиться к среднему уровню иерархии (обращение показано на рис. 1 стрелкой), который имеет вид обобщенной структурной схемы объекта. Выявив проблемный блок (он отмечен заливкой), оператор переходит (вторая стрелка) на второй средний уровень, который отображает состояние узлов контролируемого объекта в виде мнемосхем. Для количественного контроля параметров выбранного узла оператор переходит (третья стрелка) на нижний уровень иерархии. Он представлен виртуальными измерительными приборами. При построении рис. 1 использованы изображения, приведенные в источниках [11, 12].

Предлагаемый подход к распределению информации о контролируемых параметрах между уровнями иерархии интерфейса, а также к выбору элементов интерфейсного пространства позволяет снизить психофизиологическую напряженность оператора системы мониторинга без потери когнитивности.

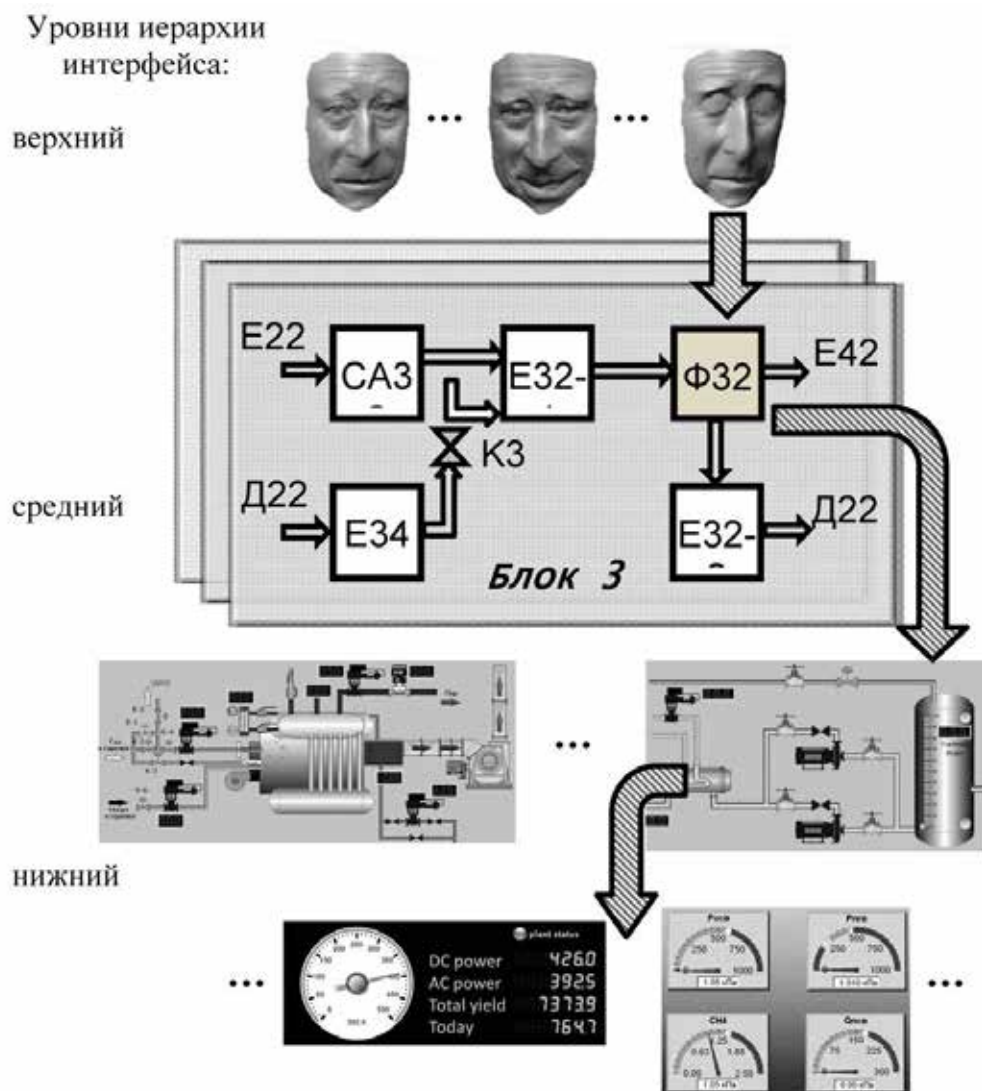


Рис. 1. Пример иерархического интерфейса

Библиографический список

1. Бершадский, А. М. Разработка и моделирование гетерогенных инфраструктур для беспроводного информационного обеспечения процессов мониторинга / А. М. Бершадский, А. Г. Финогеев, А. С. Бождай // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 1 (13). – С. 36–45.
2. Актуальные информационные технологии: визуализация информации, виртуальное окружение, неогеография, осязаемые изображения / А. Алешин, В. Афанасьев, П. Брусенцев, Е. Еремченко, А. Клименко, С. Клименко, И. Никитин, Л. Никитина, В. Пестриков, А. Сурин, О. Сурина // Научная визуализация. – 2013. – Т. 5, № 4. – С. 1–17. – URL: <http://sv-journal.com/index.php?lang=ru> (дата обращения: 15.03.2014).
3. Косников, Ю. Н. Построение интерфейса человек–компьютер для системы автоматизированного управления сложными объектами / Ю. Н. Косников // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 82–92.
4. Дюндиков, Е. Т. Технология динамической интеграции и представления разнородных данных для анализа и оценки состояния многопараметрических объектов / Е. Т. Дюндиков, А. А. Качкин // Информационные технологии. – 2010. – № 2. – С. 66–73.
5. Литвак, И. И. Основы построения аппаратуры отображения в автоматизированных системах / И. И. Литвак, Б. Ф. Ломов, И. Е. Соловейчик. – М.: Сов. радио, 1975. – 352 с.
6. Алонцева, Е. Н. Представление информации для обзора состояния энергоблока атомной станции / Е. Н. Алонцева, А. Н. Анохин, А. С. Стебенев, Э. Ч. Маршалл // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2005. – № 4. – С. 34–39.

7. Raciborski, R. Graphical representation of multivariate data using Chernoff faces / R. Raciborski // The Stata Journal. – 2009. – № 3. – P. 374–387.
8. Hunt, N. Chernoff Faces in Microsoft Excel / N. Hunt // Сайт «Wiley Online Library». – URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-9639.2004.00173.x/abstract> (дата обращения: 15.08.2016).
9. Создание 3D-моделей на основе фотографий: обзор решений // Сайт «3Domen». – URL: <http://3domen.com/index.php?newsid=5684> (дата обращения: 15.08.2016).
10. Шалаев, В. Сервис 3DEFY: закачай фото, сделай несколько кликов, получи цифровую 3D-модель! // Сайт «3dwiki». – URL: <http://3dwiki.ru/servis-3defy-zakachaj-foto-sdelaj-neskolko-klikov-poluchi-cifrovuyu-3d-model> (дата обращения: 15.08.2016).
11. Suwajanakorn, S. Total Moving Face Reconstruction / S. Suwajanakorn, I. Kemelmacher-Shlizerman, S. M. Seitz // 13th European Conference «Computer Vision» – ECCV 2014 (Zurich, Switzerland, September 6–12, 2014), Proceedings. – Zurich, Switzerland, 2014. – Part IV. – P. 796–812. – URL: <http://grail.cs.washington.edu/projects/totalmoving> (дата обращения: 15.08.2016).
12. Комплект автоматики котла ДЕ-10-14 ГМ (ПЛК110) // Сайт ООО «Бийская Энергетическая Компания». – URL: <http://biek.ru/avtomatika-kotla-de-10-14-gm> (дата обращения: 15.08.2016).

Косников Юрий Николаевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: jkos@pnzgu.ru

Kosnikov Yuriy Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department
of information-computer systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.5

Косников, Ю. Н.

Организационная оптимизация интерфейсного пространства для визуального мониторинга многопараметрических объектов / Ю. Н. Косников // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 26–31. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-4.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 681.7.08

DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-5

А. С. Щевелев, А. В. Савенков, Д. А. Рязанцев

ПРОСТРАНСТВЕННО ОРИЕНТИРОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

A. S. Shchevelev, A. V. Savenkov, D. A. Ryazantsev

SPATIAL ORIENTED METHOD OF DETERMINING STRAIN FOR THE PREVENTION OF ACCIDENTS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования является метод определения деформации для предупреждения возникновения аварийных ситуаций в изделиях ракетно-космической и авиационной техники. Предметом исследования является метод раннего обнаружения повреждений, реализованный на методах акустического и ультразвукового неразрушающего контроля. В основу метода положены особенности взаимодействия волны Лэмба и волоконных брэгговских решеток. Целью работы является определение путей эффективной реализации пространственно ориентированного метода определения деформации. **Материалы и методы.** Определены обобщенные требования со стороны измерительной системы на основе предложенного метода, влияющие на метрологические и эксплуатационные характеристики чувствительных элементов. Проведен анализ методов опроса и расшифровки результатов измерений деформации. Оценены преимущества и недостатки высокоскоростных методов опроса длин волн. **Выводы.** Даны рекомендации для достижения максимальной эффективности метода путем построения измерительной системы на волоконно-оптических компонентах. В частности, применением оптоволокну с покрытием из графитопластика в качестве источника акустических волн. Данное решение позволяет увеличить чувствительность к измеряемым параметрам деформации и температуры. Обоснован выбор метода опроса датчиков волоконных брэгговских решеток в зависимости от измеряемой частоты. С частотой измерения до 1 кГц целесообразно применение перестраиваемого оптофильтра Фабри – Перо, для частоты 1 МГц и выше – применение лазерного диода или перестраиваемого лазера. В свою очередь перестраиваемый лазер позволит проводить одновременное измерение как статической, так и динамической деформации. Даны рекомендации по применению метода в изделиях ракетно-космической и авиационной техники.

A b s t r a c t. Background. The object of the study is a method for determining the deformation to prevent of emergency situations in products of rocket and space and aircraft. The subject of the study is the method of early detection of damage implemented on the methods of acoustic and ultrasonic non-destructive testing. The method is based on the features of the in-

teraction of the Lamb wave and fiber Bragg gratings. The aim of the paper is to determine the ways to effectively implement a spatially-oriented method for determining deformation. **Materials and methods.** The generalized requirements from the measuring system are determined on the basis of the proposed method, affecting the metrological and operational characteristics of the sensitive elements. The analysis of methods of interrogation and decoding of deformation measurements results is carried out. Advantages and disadvantages of high-speed methods of wavelength survey are evaluated. **Conclusions.** Recommendations are given for achieving maximum efficiency of the method, by constructing a measuring system on fiber-optic components. In particular, the use of optical fiber with a coating of graphite plastic, as a source of acoustic waves. This solution increases the sensitivity to the measured strain and temperature parameters. The choice of the method of interrogation of FBD sensors based on the measured frequency is substantiated. With a measurement frequency of up to 1 kHz, it is advisable to use a tunable Fabry-Perot optical filter, for a frequency of 1 MHz or higher, the use of a laser diode or a tunable laser. In turn, a tunable laser will allow simultaneous measurement of both static and dynamic deformation. Recommendations are given on the application of the method in products of rocket and space and aviation equipment.

К л ю ч е в ы е с л о в а: волна Лэмба, волоконные брэгговские решетки, решетки на основе массива волноводов, пьезоэлектрический источник, акустическая волна.

Key words: Lamb wave, fiber bragg gratings, lattice-based array waveguides, piezoelectric source, acoustic wave.

Введение

Среди волоконно-оптических датчиков наиболее распространены датчики на основе волоконных брэгговских решеток (ДВБР). Применение таких датчиков описано в работе [1]. Определено, что преимущественно они используются для измерения деформации и температуры. На основе ДВБР могут быть построены системы неразрушающего контроля, позволяющие регистрировать деформацию как от распределенной нагрузки, так и от ударного нагружения. Системы на основе распределенных волоконных брэгговских решеток (ВБР) широко известны и характеристики таких систем подтверждены испытаниями [2, 3]. Учитывая эффективность применения системы на основе ВБР-датчиков, они могут найти применение в изделиях ракетно-космической и авиационной техники.

В АО «НИИФИ» проведены исследования по разработке микрооптоэлектромеханических распределенных измерительных и функциональных модулей деформации и температуры для построения композитных панелей с внедренными в элементы конструкции ДВБР [4]. Однако система, реализованная на разработанных модулях, не позволяет точно определить место и направление действия вектора деформации. В связи с этим разработка пространственно ориентированного метода определения деформации является актуальной научно-технической задачей. Рассматриваемый метод обнаружения возможных мест повреждений конструкций на основе ДВБР находится на ранней стадии разработки и планируется к реализации на методах акустического и ультразвукового неразрушающего контроля.

Пьезоакустические ДВБР

Применение ДВБР с целью обнаружения возможных мест возникновения аварийных ситуаций является новым методом определения деформации. Экспериментальные исследования проводились на образцах в виде алюминиевого листа с размерами, не превышающими 1×400×400 мм, где три пьезоэлектрических преобразователя и ВБР-датчик расположены в четырех углах пластины. Частоты излучения акустического сигнала 260 и 460 кГц выбраны для конфигурирования основных мод акустических волн, которые, в свою очередь, генерировались в формате тональной посылки, являющейся наиболее распространенной формой анализа. Определено, что система на основе рассмотренного метода может регистрировать трещины длиной 1–2,5 мм в листовых элементах конструкции, длиной до 5 мм – в металлическом кар-

касе, длиной до 100 мм и дефекты с размерами 15×15 мм – на больших площадях, а также определять локальную коррозию листа с размером 10 % от его толщины [5].

На основе экспериментальных исследований можно сделать предварительные выводы.

Во-первых, при высокой частоте излучения акустических волн достигается увеличение чувствительности за счет слабой интерференции волн и большого значения коэффициента отношения размера повреждения к длине волны. Причем акустические волны, отраженные от границы алюминиевого листа, формируют колебания, содержащие многократно отраженные волны. Негативный эффект переотражений волн усиливается конструкцией сложной формы.

Во-вторых, в сигнале должны рассматриваться только первые два импульса, поскольку более поздние импульсы неинформативны, так как являются откликом переотражений.

В-третьих, ДВБР могут использоваться для регистрации акустических сигналов, причем результаты показывают, что эффективность таких датчиков не уступает пьезоакустическим преобразователям. Кроме того, отклик на акустические волны зависит от взаимного расположения пьезоэлектрических источников излучения и ДВБР. В этом случае по амплитуде принимаемого сигнала оценивается направление акустических волн.

Для подтверждения третьего предварительного вывода проведены исследования, определяющие особенности взаимодействия волны Лэмба и волоконных брэгговских решеток относительно взаимного расположения излучателей и приемника (рис. 1).

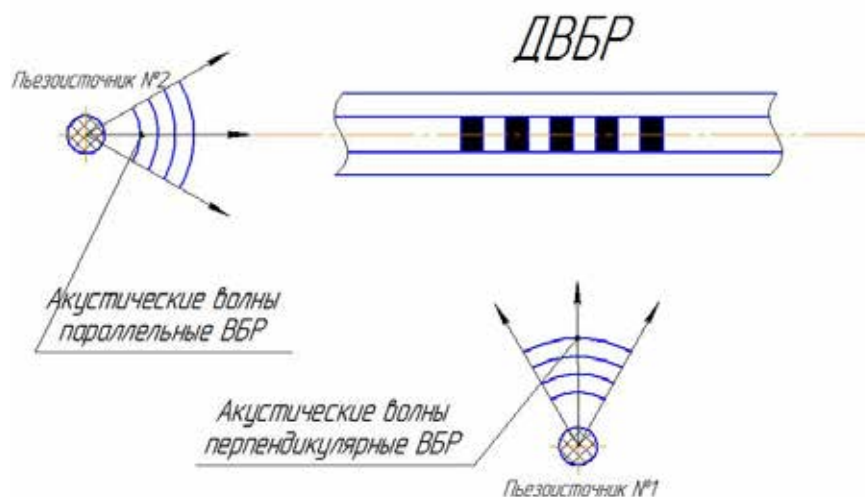


Рис. 1. Взаимное расположение пьезоэлектрических источников излучения и ДВБР

Исследования включали два этапа. Пьезоэлектрический источник № 1 формировал акустические волны, перпендикулярные оптической оси ВБР-датчика. Пьезоэлектрический источник № 2 осуществлял генерацию акустических волн в направлении, совпадающем с оптической осью ДВБР. Результаты исследования показали, что в случае распространения волн Лэмба вдоль оптической оси амплитуда принимаемого сигнала возрастает в 100 раз сильнее, чем при поперечном направлении [5]. Благодаря этой особенности становится возможным пространственно ориентированный метод определения деформации.

Для увеличения чувствительности ДВБР устанавливают в металлическую трубку, которая, в свою очередь, встроена в конструкцию [3, 6]. Поскольку брэгговская решетка изолирована от воздействия акустических волн внутри трубки, ДВБР не чувствителен к их воздействию. Данная проблема может быть решена путем встраивания в структуру (такую как композит) элементов конструкций одного конца волокна. Композиты находят все более широкое применение в ракетно-космической технике и авиастроении как замена металлу для снижения массы и увеличения полезной нагрузки.

Для достижения максимальной эффективности данного метода контроля предпочтительно полностью реализовать измерительную систему на основе волоконно-оптических компонентов. Источником излучения в таком случае может являться оптическое волокно с периодической оболочкой из эпоксидного графитопластика. Этот материал способен поглощать

лазерное импульсное излучение, что приводит к локальному резкому росту температуры, как следствие, к термическому расширению и созданию акустических волн. В данном методе и источник, и приемник излучения будут реализованы с использованием волоконно-оптических технологий.

Система опроса длин волн

Измерительная система из массива ДВБР может быть использована для обнаружения как статических, так и динамических деформаций, а также возникновения повреждений на ранней стадии разрушения конструкции. Возможная схема реализации этих функций показана на рис. 2.

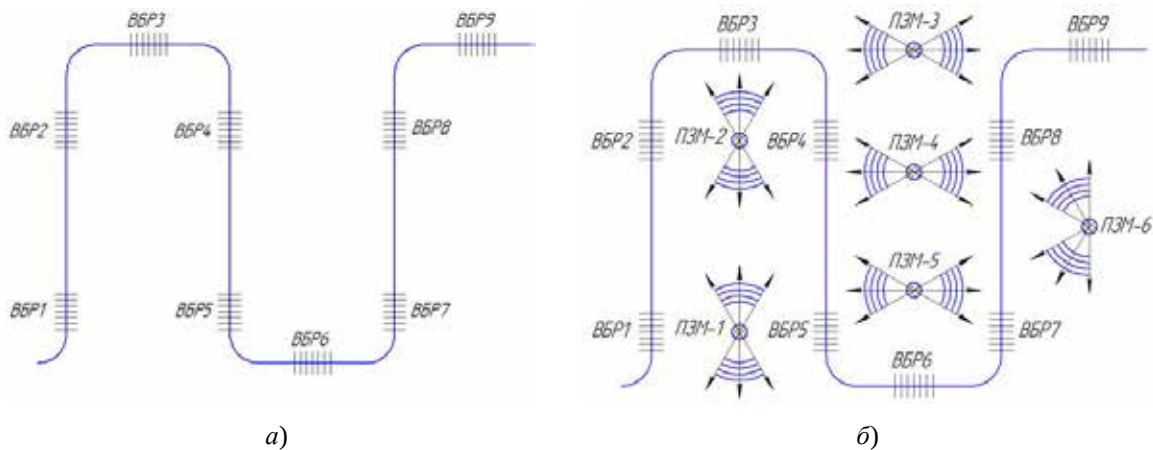


Рис. 2. Двухмерная структура мониторинга:
а – контроль статической деформации; б – регистрация ударных и быстропеременных нагрузок с использованием пьезомодулей и ДВБР

Очевидно, что для решения этих задач могут потребоваться десятки ДВБР. В целях обеспечения точного и надежного измерения деформаций с учетом температурной компенсации применяются ВБР-датчики в форме розетки, как показано на рис. 3, с помощью которых можно увеличить количество точек измерения.

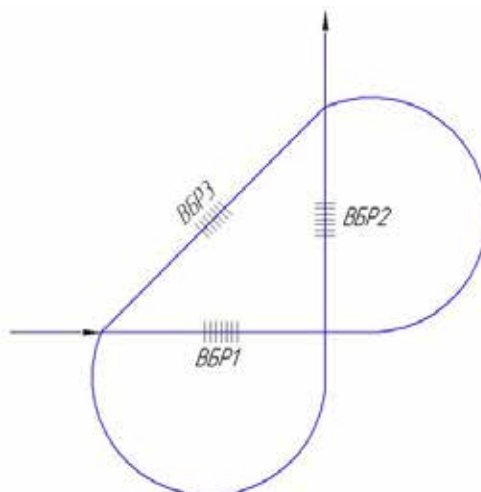


Рис. 3. Розеточная конфигурация ВБР-датчиков

Таким образом, для акустической системы требуются десятки или даже сотни ДВБР, что усложняет процесс измерений. Для обеспечения одновременного опроса десятков или сотен ВБР-датчиков требуется частота опроса от нескольких десятков до сотен кГц для подбора акустических волн. Более того, значение деформации, вызванные акустическими волнами, очень

малы, и их амплитуды находятся на уровне от десятков до нескольких сотен мкм/м, причем чувствительность к деформации традиционного ДВБР с длиной волны 1550 нм составляет 1 пм/(мкм/м), поэтому для измерения акустических волн требуется высокое разрешение.

За последние годы были разработаны высокоскоростные методы опроса длин волн – лазер пространства Фурье с синхронизацией мод, лазер с регулируемой длиной волны и лазер с качающейся длиной волны, основанной на вибрации волокон [7]. Системы на основе этих методов имеют высокую стоимость и сложную конфигурацию. Методы опроса ДВБР могут быть классифицированы по измеряемым процессам и анализу результатов измерений (рис. 4). Метод на основе качающейся длины волны за счет механически подвижных частей, таких как источник перестраиваемого лазера или перестраиваемый оптофильтр Фабри – Перо, применяется для опроса длины волны с одновременным измерением частоты до 1 кГц. Для измерения частоты более 1 кГц сдвиги брэгговских длин волн должны быть преобразованы в оптическую мощность посредством оптического фильтра без введения каких-либо механически подвижных частей.

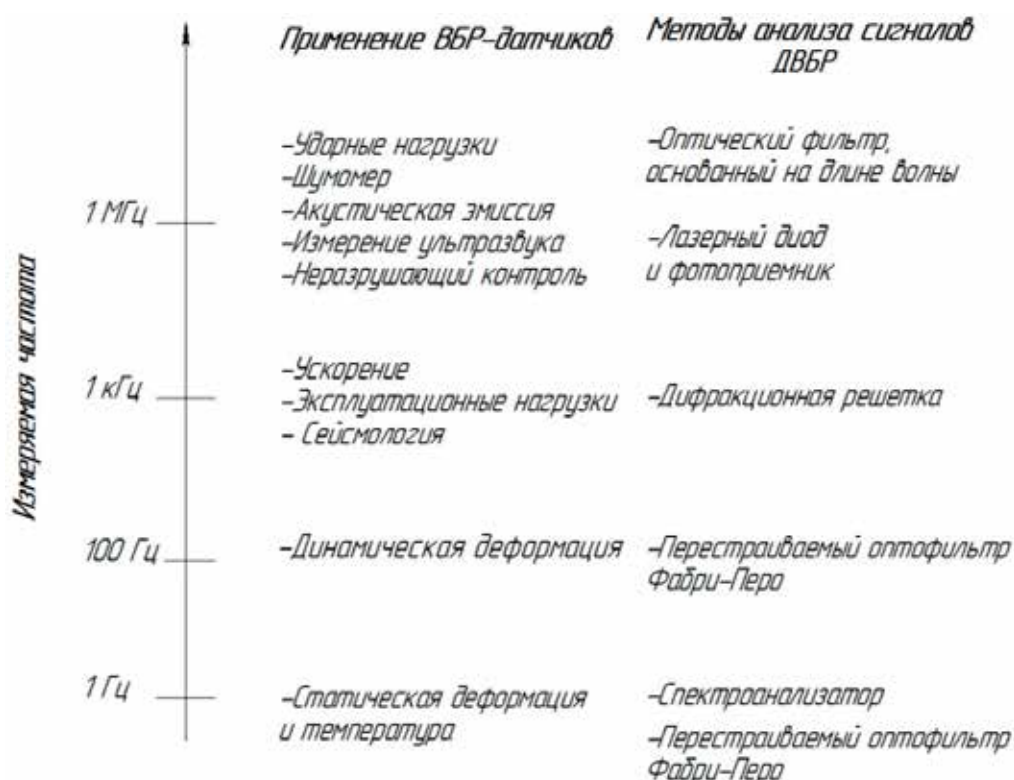


Рис. 4. Методы опроса ВБР-датчиков, классифицированные по измеряемой частоте

Основной принцип определения длины волны с использованием лазерного диода прост. Длина волны диода устанавливается в начальное положение спектра ВБР. Если спектр ВБР сдвигается, то отраженная мощность оптического излучения на фотоприемнике изменяется пропорционально. Следовательно, сдвиги длины волны могут быть зарегистрированы посредством изменения оптической мощности. Лазерный диод может быть заменен на перестраиваемый лазер для одновременного измерения статической и динамической деформации. В этом случае перестраиваемый лазер имеет два режима работы. Один из них – фиксированный выход с заданной длиной волны для измерения акустических волн, подобный использованию лазерного диода. Другой режим работы определяет смещение длины волны. В этом случае на выходе лазер может проанализировать спектр измерения эксплуатационной нагрузки. Преимущество применения перестраиваемого лазера заключается в высокой разрешающей способности и точности из-за его низкого уровня шума и узкой полосы излучения. Однако при измерении акустических волн имеются ограничения из-за большой стоимости и сложности в обеспечении требований при одновременном опросе множества ДВБР.

Некоторые методы анализа сигналов были разработаны с целью определения длин волн для измерений в акустическом диапазоне, включая сравнение ВБР, для опроса длиннопериодных волоконных решеток и решеток на основе массива волноводов (РОМВ) [8, 9]. Метод на основе РОМВ для измерения акустической волны позволяет установить оптический длинноволновый фильтр, обладающий линейной зависимостью. Оптический фильтр включает в себя нарастающий и задний фронт на двух смежных каналах. Брэгговская длина волны устанавливается посередине двух каналов РОМВ. Уровень мощности двух каналов зависит от брэгговской длины волны. Таким образом, анализируя соотношения оптической мощности, можно получить информацию об изменении длины волны ВБР. Поскольку метод на основе РОМВ позволяет одновременно опрашивать множество ВБР-датчиков, этот метод идеально подходит для акустической ВБР-системы. Кроме того, система опроса на основе РОМВ имеет сравнительно малую массу и габариты, что делает ее идеальной для применения в ракетно-космической и авиационной технике.

Заключение

Рассмотренный метод является перспективным для применения в ракетно-космической и авиационной технике с целью обнаружения как статических, так и динамических деформаций, а также возникновения повреждений на ранней стадии разрушения конструкции.

Для внедрения метода в изделия ракетно-космической и авиационной техники необходимо решить вопросы, связанные с прочностью и надежностью конструкции датчика, с определением местоположения датчиков и метода их монтажа в структуре исследуемого изделия.

Библиографический список

1. Moorey, W. W. Applications of fibre grating sensors / W. W. Moorey, G. A. Ball, H. Singh // Proc. SPIE. – 1996. – Vol. 2839, № 2-7.
2. Aldridge, N. Operational load monitoring for aircraft and maritime applications / N. Aldridge, P. D. Foote, I. Read // Strain. – 2000. – Vol. 36. – P. 123–126.
3. Response of fiber Bragg gratings to longitudinal ultrasonic waves / A. Minardo, A. Cusano, R. Bernini, L. G. Zeni, M. Giordano // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control. – 2005. – Vol. 52. – P. 304–312.
4. Пат. № 154472 Российская Федерация. Измерительный функциональный модуль деформации / Щевелев А. С., Удалов А. Ю., Кикот В. В. Приоритет от 03.03.2013. Заявл. 03.03.2015 ; опублик. 30.07.2015.
5. Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Air Platforms / Honglei Guo, Gaozhi Xiao, Nezih Mrad, Jianping Yao // Sensors. – 2011. – Vol. 11.
6. Coppola, G. Analysis of feasibility on the use of fiber Bragg grating sensors as ultrasound detectors / G. Coppola // Proc. SPIE. – 2001. – Vol. 4328. – P. 224–232.
7. Culshaw, B. The detection of ultrasound using fiber-optic sensors / B. Culshaw, G. Thursby, D. Betz, B. Sorazu // IEEE Sens. J. – 2008. – Vol. 8. – P. 1360–1367.
8. Betz, D. C. Identification of structural damage using multifunctional Bragg grating sensors: I. Theory and implementation. / D. C. Betz, G. Thursby, B. Culshaw, W. J. Staszewski // Smart Mat. Struct. – 2006. – Vol. 75. – P. 1305–1312.
9. Betz, D. C. Acousto-ultrasonics sensing using fiber Bragg grating / D. C. Betz, G. Thursby, B. Culshaw, W. J. Staszewski // Smart Mater. Struct. – 2003. – Vol. 12. – P. 122–128.

Щевелев Антон Сергеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: antonfbg@gmail.com

Shchevelev Anton Sergeevich

candidate of technical sciences, senior staff scientist,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Савенков Александр Валерьевич

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: nik2@niifi.ru

Savenkov Aleksandr Valer'evich

engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Рязанцев Дмитрий Андреевич

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: nik2@niifi.ru

Ryazantsev Dmitriy Andreevich

engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 681.7.08

Щевелев, А. С.

Пространственно ориентированный метод определения деформации для предупреждения возникновения аварийных ситуаций / А. С. Щевелев, А. В. Савенков, Д. А. Рязанцев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 32–38. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-5.

С. П. Санников, В. В. Побединский, А. А. Побединский

МОДЕЛЬ РАССЕЙВАНИЯ РАДИОВОЛН В ЛЕСНОЙ СРЕДЕ

S. P. Sannikov, V. V. Pobedinsky, A. A. Pobedinskiy

MODEL SCATTERING OF RADIO WAVES IN A FOREST

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования являлись участки лесной среды с различными лесонасаждениями. Предметом исследований являлись закономерности изменения величины рассеяния радиоволн в процессе радиочастотного мониторинга леса в зависимости от характеристик лесной среды, конструктивных параметров аппаратуры, параметров электромагнитного излучения и климатических условий. Цель работы заключалась в разработке модели рассеивания радиоволн в лесной среде. **Материалы и методы.** Для проведения исследований в качестве научных методов использованы методы математического моделирования, теории информации и передачи сигналов, методы расчета электромагнитных полей в лесных массивах, теория эксперимента, математической статистики. Для экспериментов были разработаны методики и оборудование для лабораторных и экспериментальных исследований, которое включает датчики (метки) RFID, передатчик, антенны трех типов, приемник, компьютер и специально разработанное программное обеспечение для обработки принимаемой информации. **Результаты.** Результатами являются предложенные расчетная модель распространения прямой волны в лесной среде, геометрическая расчетная модель распространения луча радиоволны в лесу и модель рассеивания радиоволн в лесной среде. Полученные результаты необходимы для проектирования систем радиочастотного мониторинга лесного фонда. **Выводы.** Полученная модель рассеивания радиоволн в лесной среде учитывает все основные влияющие параметры, дает достаточно точные результаты, адекватность модели подтверждена результатами экспериментальных исследований, поэтому результаты могут быть рекомендованы для использования при проектировании систем радиочастотного мониторинга леса.

A b s t r a c t. Background. The subject of the study were sections of the forest environment with different forest plantations. The subject of the research were the regularities of the change in the magnitude of the scattering of radio waves in the process of radio frequency monitoring of the forest, depending on the characteristics of the forest environment, the design parameters of the equipment, the parameters of electromagnetic radiation and climatic conditions. The aim of the work was to develop a model for scattering radio waves in the forest environment. **Materials and methods.** To conduct research as scientific methods, mathematical modeling methods, information theory and signal transmission, methods for calculating electromagnetic fields in forest areas, theory of experiment, mathematical statistics were used. For the experiments, techniques and equipment for laboratory and experimental studies were developed that includes RFID sensors, transmitters, three types of antennas, a receiver, a computer and specially developed software for processing received information. **Results.** The results are the proposed design model for propagation of a direct wave in a forest environment, a geometric design model for the propagation of a radio wave beam in a forest, and a model for dispersing radio waves in a forest environment. The obtained results are necessary for the design of radio-frequency monitoring systems of the forest fund. **Conclusions.** The received model of radio wave scattering in the forest environment takes into account all the main influencing parame-

ters, gives fairly accurate results, the adequacy of the model is confirmed by the results of experimental studies, therefore the results can be recommended for use in the design of radio frequency monitoring systems of the forest.

К л ю ч е в ы е с л о в а: радиочастотный мониторинг лесного фонда; рассеивание радиоволн в лесной среде; комплексная диэлектрическая проницаемость участка леса; параметры лесной среды.

Key words: radio frequency monitoring the timber fund; the diffusing radio waves in timber ambience; complex dielectric constant of the forest area; parameters of the timber ambience.

Введение

В настоящее время для решения глобальной проблемы сохранения лесов приняты соответствующие программные документы на государственном уровне, в том числе «Основы государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года», которые предусматривают создание новых дистанционных систем наземного, авиационного и космического мониторинга пожарной опасности, защиты от незаконных рубок и использование инновационных информационных технологий. Разработанная [1, 2] с этой целью принципиально новая система (рис. 1) в виде сети устройств для непрерывного радиочастотного мониторинга лесного фонда в качестве одной из исходных величин использует значение рассеивания радиоволн в лесной среде. В наиболее подробных по этой теме исследованиях [3] указанный параметр получен на моделях деревьев с абсолютно гладкой поверхностью, геометрически правильной цилиндрической формы и равномерно распределенных по площади. Такая идеализация может давать значительные погрешности работы и приводить к функциональной непригодности всей системы радиочастотного мониторинга, которая должна учитывать перемещение лесоматериалов в лесу с точностью до одного бревна.

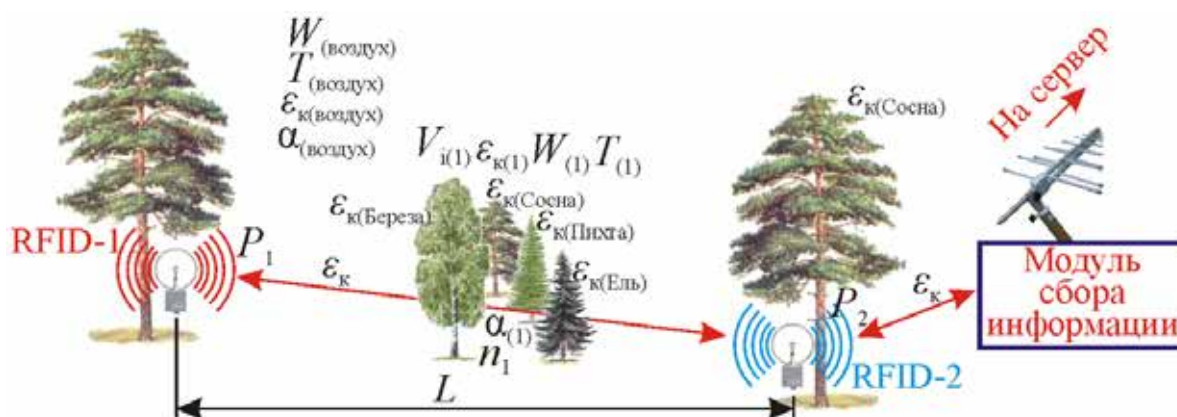


Рис. 1. Схема сети радиочастотного мониторинга лесного фонда:

RFID-1 – RFID-4 – датчики; P – мощность сигнала; W – влажность; T – температура; n – количество деревьев; L – расстояние между датчиками; V_i – объемная доля i -го компонента лесной среды; α – константа вида лесного массива; ϵ_k – комплексная диэлектрическая проницаемость

Таким образом, определилась **цель** настоящих исследований, которая заключалась в разработке модели рассеивания радиоволн в лесной среде.

Для достижения цели решались следующие **задачи**:

- обоснование перечня параметров, необходимых для создания адекватной модели;
- разработка геометрической расчетной модели распространения луча радиоволны в лесу;
- разработка математической модели в общем виде рассеивания радиоволн в лесной среде;

– разработка методики и аппаратуры для экспериментальных исследований процессов радиочастотного мониторинга лесной среды;

– выполнение натурных экспериментальных исследований в лесной среде и оценка адекватности теоретической модели.

Для проведения исследований в качестве научных методов использованы методы математического моделирования, теории информации и передачи сигналов, методы расчета электромагнитных полей в лесных массивах, теория эксперимента, математической статистики.

Расчетная схема представлена на рис. 2, где на среднее поле прямой волны влияют диаметры стволов деревьев d , диэлектрическая проницаемость древесины ϵ_d и остальных элементов лесной среды, хвои, листьев, воздушного пространства вокруг деревьев, поэтому в расчетах будем использовать усредненные значения параметров растительности:

- диаметр ствола деревьев d ;
- высота деревьев h ;
- расстояние источника электромагнитных волн до точки измерения поля, т.е. приемной антенны ресивера l ;
- длина волны λ ;
- амплитуда энергии источника электромагнитных волн U или вектор рассеяния поля бесконечным цилиндром $U(x)$;
- электрическая проводимость древесины σ ;
- диэлектрическая проницаемость среды и древесины ϵ ;
- распространение электромагнитной волны происходит в лесной среде со средней постоянной густотой деревьев G .

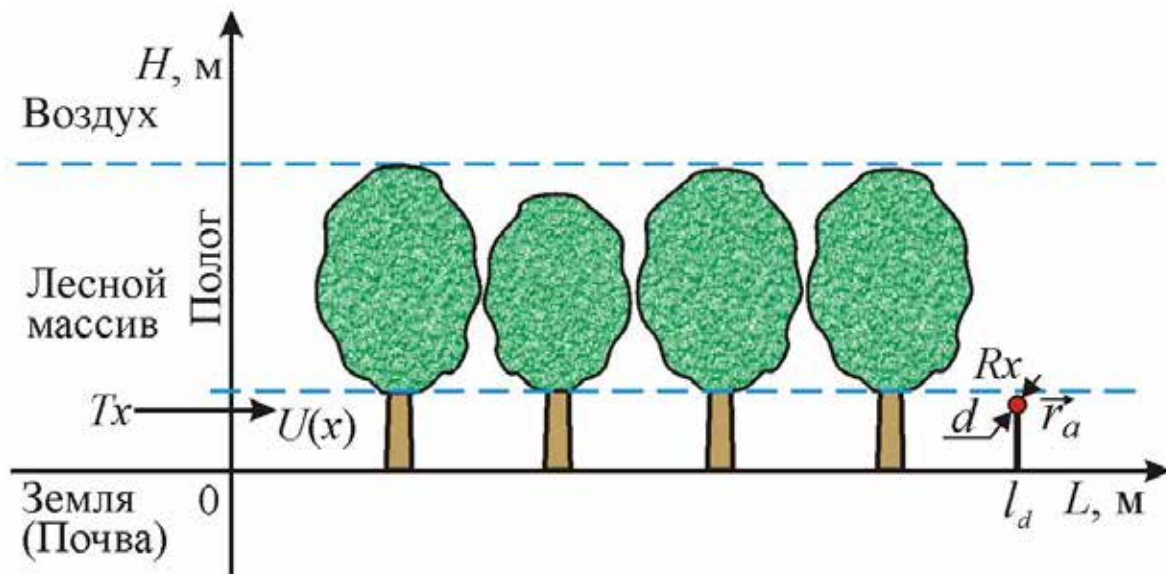


Рис. 2. Расчетная модель распространения прямой волны в лесной среде:
 H, L – координаты модели (высота, расстояние); Tx, Rx – передатчик, приемник; $U(x)$ – энергия источника электромагнитных волн, которая ослабляется на пути L ; l_d – координата приемной антенны с диаметром d ;
 $\vec{r}_d$ – энергии электромагнитной волны в точке приема l_d

Деревья на трассе распространения потока электромагнитной волны располагаются дискретно и случайным образом, а общую среднюю густоту деревьев G можно подсчитать по формуле

$$G = \frac{10^4 N_i}{s}, \text{ шт./га}, \quad (1)$$

где N_i – количество деревьев на трассе распространения потока электромагнитной волны, шт.; s – площадь вдоль трассы распространения потока электромагнитной волны с шириной 1 м, м².

Приведенные параметры рассматриваются в работе [3] на моделях деревьев с абсолютно гладкой поверхностью цилиндрической формы и распределенных на модельной территории равномерно.

Для получения зависимости для реальных условий введем понятие комплексной диэлектрической проницаемости лесной среды $\epsilon^* = f(\epsilon_d, \epsilon_l, \epsilon_x, \epsilon_k, \epsilon_t, \epsilon_z, \epsilon_v)$. Здесь индексы при переменных ϵ указывают на принадлежность к следующим элементам лесной среды:

- д – древесине ствола дерева;
- л – листьям;
- х – хвое;
- к – кроне деревьев и кустов;
- т – траве;
- з – земле (почве);
- в – воздуху.

Среднее поле рассеивания электромагнитных волн в лесной среде $W(\vec{l}_d)$, где деревья представляют собой объекты со случайным расположением и случайной неоднородностью, зависит от множества параметров, влияющих на когерентность прямой волны $I(\vec{l}_d)$. Рассеивание волн в такой случайной дискретной лесной среде подробно исследовано А. Исимару [4], но имеются ограничения, которые в нашем случае являются недостатками. Так, при рассмотрении автор использовал модели в виде плоских прямоугольных поверхностей, которые не сочетаются с формой стволов деревьев. Автор использовал обозначение функции $\bar{r}_a(x_a)$ энергии электромагнитной волны в точке приема a на радиусе распространения волны. Напряженность электромагнитного поля ультракоротких волн (УКВ) в точке приема зависит от протяженности l с встречающимися элементами на пути с диаметром d . Отсюда следует, что функция $\bar{r}_a(x_a)$ в произвольной точке приема a связана с величиной рассеивания радиоволн $W(\vec{l}_d)$ на протяженности l_d до приемной антенны в лесу с определенным количеством деревьев на пути, определяемым густотой деревьев G (1):

$$\bar{r}_a(x_a) \leftrightarrow W(\vec{l}_d). \quad (2)$$

Тогда для вывода уравнения расчета потенциала $U(\vec{r}_a)$ [В, Вт, дБм] электромагнитной волны в точке a на пути распространения радиосигнала в лесном массиве применим теорию многократного рассеивания радиоволн [4]:

$$U(\vec{r}_a) = \sum_{s=1}^N E(\Psi_i^s), \quad (3)$$

где E – величина напряженности электромагнитного поля в направлении $\vec{r}_a$ на пути распространения [В, Вт, дБм]; Ψ_i^s – параметр, влияющий на прохождение радиоволн в массиве лесной среды определенным индексом дерева s , для i -го измерения.

Параметр Ψ_i^s имеет прямую зависимость с протяженностью канала передачи данных.

С учетом вышесказанного модель в общем виде величины рассеивания радиоволн $W(\vec{l}_d)$ в лесной среде выглядит так:

$$W(\vec{l}) = \left[kl \left(\langle E, J, S, \sigma, \epsilon^*, G \rangle \right) \right], \quad (4)$$

где k – волновое число среды, m^{-1} ; l – протяженность от источника радиоволны до точки наблюдения, м; J – плотность тока в антенне, A/m^2 ; S – площадь поперечного сечения дерева, m^2 ; ϵ^* – комплексная диэлектрическая проницаемость среды, Φ/m ; G – густота деревьев в лесной среде, шт./ m^2 ; σ – удельная проводимость среды (волновое сопротивление), Cm/m .

Известно, что радиоволны распространяются равномерно во всех направлениях от источника сигнала. Для определения величины рассеивания радиоволн $W(\vec{l}_d)$ на протяженности l_d в точке a расположения приемной антенны в лесу рассмотрим один луч в направлении антенны ресивера r_a , который выразим в векторной форме с углом раствора α . Для исследования

этого вопроса разработана геометрическая расчетная модель распространения луча радиоволны в лесу, ее графическое представление показано на рис. 3.

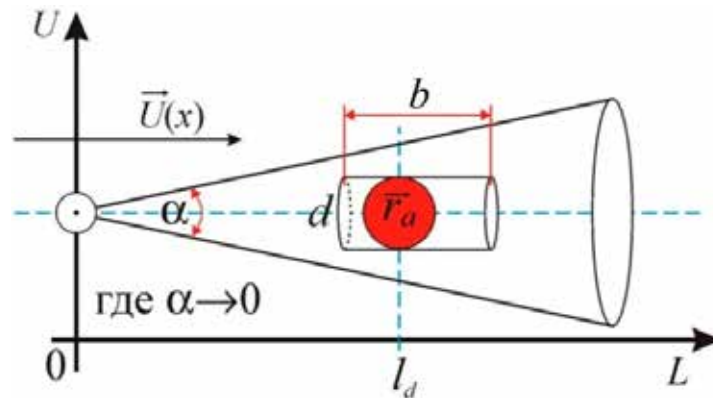


Рис. 3. Геометрическая расчетная модель распространения луча радиоволны в лесу: U , $U(x)$ – энергия источника электромагнитных радиоволн и вектор ее распространения; $\vec{r}_a$ – радиус-вектор расстояния до антенны ресивера (приемника); d – размер антенны; l_d – координата приемной антенны; L – протяженность распространения радиоволн; b – длина антенны; α – угол раствора луча

Размер d антенны ресивера (приемника) r_a выбирается кратным длине волны в сторону увеличения и в сторону уменьшения, например: 2λ ; λ ; $\frac{1}{2}\lambda$; $\frac{1}{4}\lambda$, и т.д. Тогда плотность энергии радиоволн в точке приемной антенны ресивера с координатой l_d зависит от волнового числа среды k и площади антенны S :

$$S = wG = EH, \quad (5)$$

где w – плотность энергии электромагнитной волны, которая зависит от электрического и магнитного поля $w = w_e + w_m$; E , H – электрическое и магнитное поле электромагнитной волны; G – коэффициент пропорциональности, густота деревьев в лесной среде.

Вектор плотности потока электромагнитной энергии радиоволны принято называть вектором Умова – Пайнтинга [5], и с его учетом формула (5) записывается в следующем виде:

$$\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}], \quad (6)$$

или в дифференциальной форме:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div} \vec{S} = 0. \quad (7)$$

Из курса физики известно, что электрическое w_e и магнитное w_m поля связаны между собой и распространяются в противоположных плоскостях, зависят от электрической ϵ и магнитной μ проницаемости среды. Тогда запишем общую плотность энергии электромагнитной волны с учетом сказанного:

$$w = w_e + w_m = (\epsilon_0 \epsilon E^2)/2 + (\mu_0 \mu H^2)/2, \quad (8)$$

где индекс 0 означает начальную проницаемость.

Частота электромагнитных волн в экспериментах по настоящей работе была принята 0,9 и 2,4 ГГц. Поскольку длина волны составляет несколько десятков миллиметров (точнее 330 и 135 мм соответственно), а расстояния до объекта наблюдения от источника сигнала больше 1 м, то магнитной проницаемостью в дальнейшем можно пренебречь в силу ее ничтожно малой величины.

Из уравнения (8) можно предположить, что энергия распространения электромагнитной энергии зависит от проводимости лесной среды. С другой стороны, лес является неоднородной анизотропной средой с хаотично расположенными элементами лесной среды, их размеры по-разному влияют на распространение радиоволн.

Для учета этих факторов введем понятие комплексной проницаемости и проводимости леса. Тогда для расчета эффективной проводимости леса σ_3 на участке от передатчика до приемника можно получить выражение

$$\sigma_3 = \sum_i^n \sigma_i, \quad (9)$$

где σ_i – проводимость i элемента леса на пути распространения радиоволны; n – количество элементов леса на пути распространения радиоволны (деревья, подрост, кусты и пр.).

Под элементами лесной среды, которые влияют на распространение электромагнитной энергии от передатчика, будем понимать:

- стволы деревьев;
- ветки деревьев и кустарников;
- листья;
- траву;
- крону деревьев как интегрированный элемент дерева;
- воздушное пространство в лесу.

Все перечисленные элементы лесной среды имеют объем со свойствами, влияющими на распространение радиоволны. Для каждого из элементов лесной среды значения можно усреднить и измерить отдельно, например в лаборатории. По данным [5], высокочастотная энергия электромагнитных волн распространяется по поверхности материального тела. В данном случае все элементы леса являются отдельно расположенными в пространстве, имеют различные размеры, и можно сделать вывод, что они дискретны. Для простоты объяснения примем воздушное пространство в лесу как сплошную среду. Эффективная проводимость леса является комплексной величиной, поэтому по правилу амплитуд в математике запишем выражение для ее расчета:

$$\sigma_3 = \sigma' + i\sigma'', \quad (10)$$

где σ' , σ'' – действительная и мнимая части комплексного числа; i – мнимая единица, равная $\sqrt{-1}$.

Рассмотрим среду распространения электромагнитной волны (рис. 2) с условной электрической проводимостью $\sigma = 0$. Пусть распространяется электромагнитная волна в направлении, задаваемом единичным вектором $\vec{m}$. Тогда можно записать волновое уравнение в одномерном пространстве $x = \vec{m}\vec{r}$, которое является произведением единичного вектора $\vec{m}$ и радиус-вектора расстояния до точки наблюдения $\vec{r}$ для сферического распространения электромагнитных волн [5]:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{c^2}{\epsilon\mu} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2}, \quad (11)$$

где $\vec{E}$ – вектор напряженности электромагнитного поля в лесной среде; c – скорость света; ϵ , μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости лесной среды; x – координата в направлении распространения электромагнитной энергии.

Уравнение (11) описывает две волны в направлении $\pm \vec{m}$ с некоторой фазовой скоростью $v = \omega/k$:

$$\frac{c^2}{\epsilon\mu} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} = v. \quad (12)$$

Тогда покажем напряженность электромагнитного поля для скалярного (круглые скобки) и векторного (квадратные скобки) произведения членов волнового уравнения:

$$\begin{aligned} \text{div} \vec{E} &= \frac{\partial}{\partial x} (\vec{m} \vec{E}), \\ \text{rot} \vec{E} &= \frac{\partial}{\partial x} [\vec{m} \vec{E}]. \end{aligned} \quad (13)$$

Воспользуемся уравнением Максвелла с нулевой проводимостью в векторной форме [6]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\vec{m}\vec{E}) = -\mu_0\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \\ \frac{\partial}{\partial x}(\vec{m}\vec{H}) = -\varepsilon_0\varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \\ \frac{\partial}{\partial x}[\vec{m}\vec{E}] = 0, \\ \frac{\partial}{\partial x}[\vec{m}\vec{H}] = 0. \end{cases} \quad (14)$$

После совместного решения уравнений (14) и (11) получим связь между полями в электромагнитной волне:

$$\vec{E} = -\sqrt{\frac{\mu_0\mu}{\varepsilon_0\varepsilon}}[\vec{m}\vec{H}]. \quad (15)$$

Отношение магнитной проницаемости к диэлектрической проницаемости обозначим символом $Z = \sqrt{\frac{\mu_0\mu}{\varepsilon_0\varepsilon}}$ и назовем волновым сопротивлением лесной среды [5]. Величина Z указывает на характеристику среды, которая состоит из двух частей. Соответственно отношение $\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$ – это волновое сопротивление свободного пространства, а отношение $\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ – волновое сопротивление среды, в которой распространяется радиоволна.

Перепишем уравнение (15) для гармонически меняющейся энергии поля в лесу в любой ее точке:

$$E(x, t) = E_0(x) \exp(-i\omega t), \quad (16)$$

где x, t – координата и время; ω – круговая частота.

Из уравнения (16) видно, что энергия поля меняется от положения координаты, времени и частоты [7].

Теперь для уравнения (11) избавимся от производных по времени. С этой целью для решения уравнения Гельмгольца воспользуемся методикой, предложенной В. Б. Ивановым [5]. Условие решения уравнения с гармонической зависимостью от начальной пространственной координаты $E_0 \sim \exp(ikx)$ определяется выражением

$$\frac{d^2 \vec{E}}{dx^2} = \frac{c^2}{\varepsilon\mu} \frac{d^2 \vec{E}}{dx^2}, \quad (17)$$

или после соответствующих преобразований [5]:

$$\frac{d^2 \vec{E}}{dx^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \left(\varepsilon + i \frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega} \right) \mu E_0 = 0. \quad (18)$$

Из уравнения (18) получим дисперсионное соотношение с учетом характеристики лесной среды, называемое в теории волн волновым числом среды [5]:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \left(\varepsilon + i \frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega} \right) \mu = \frac{\omega^2}{c^2} \mu \varepsilon^*. \quad (19)$$

Здесь проводимость тождественна эффективной проводимости лесной среды (10), или $\sigma_s \equiv \sigma$, и является комплексной величиной, тогда и диэлектрическая проницаемость лесной среды становится комплексной благодаря проводимости:

$$\varepsilon + i \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} = \varepsilon^*, \quad (20)$$

которую по закону амплитуд можно записать в следующем виде:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon'', \quad (21)$$

С учетом вышеизложенного анализа распространения электромагнитных волн в лесной среде, где на ее параметры влияют физические свойства, такие как проводимость, диэлектрическая проницаемость, рассмотренные в формулах (6)–(21), перепишем формулу через волновое уравнение (1):

$$G = k\varepsilon\mu \cdot t(E), \quad (22)$$

где t – тензор поля распространения электромагнитной энергии во времени.

Вернемся к выражению (4), которое перепишем с учетом уравнений (5), (19), (21) и модели распространения луча (рис. 3) и получим следующее соотношение для расчета величины рассеивания радиоволн в отдельно взятой точке лесной среды:

$$W(x) = \exp\left[ikx(1 + GS_a(\varepsilon - 1))\right], \quad (23)$$

где k – волновое число среды (определено выше); x – координата расположения приемного устройства; G – коэффициент пропорциональности, густота деревьев в лесной среде; S_a – площадь лесной среды, занимаемая антенной T_x или R_x ; ε – диэлектрическая проницаемость среды.

Перепишем уравнение (23) для лесной среды с учетом модели распространения луча (рис. 3), заменив координату a расстоянием от источника сигнала до приемника, а также перейдя от площади антенны к ее диаметру и получим модель рассеивания радиоволн в лесной среде в общем виде:

$$W(\vec{l}_d) = \exp\left[ikl_d\left(1 + \frac{G\pi d^2}{4}(\varepsilon^* - 1)\right)\right], \quad (24)$$

где l – протяженность от источника радиоволны до точки измерения; d – диаметр антенны (луча электромагнитных волн); ε^* – комплексная диэлектрическая проницаемость лесной среды в точке приема сигнала.

Для подтверждения адекватности модели проведены экспериментальные исследования радиочастотного мониторинга лесной среды. Разработанный экспериментальный комплекс изображен на рис. 4. Фрагменты проведения экспериментальных исследований показаны на рис. 5. Результаты эксперимента показаны на рис. 6.

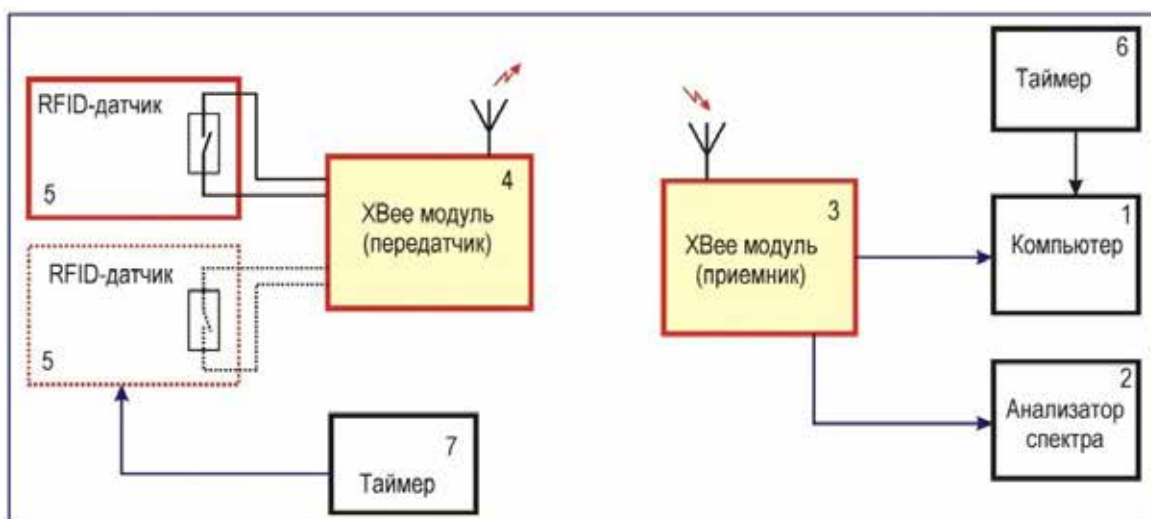


Рис. 4. Структурная схема установки сети беспроводных RFID-устройств:

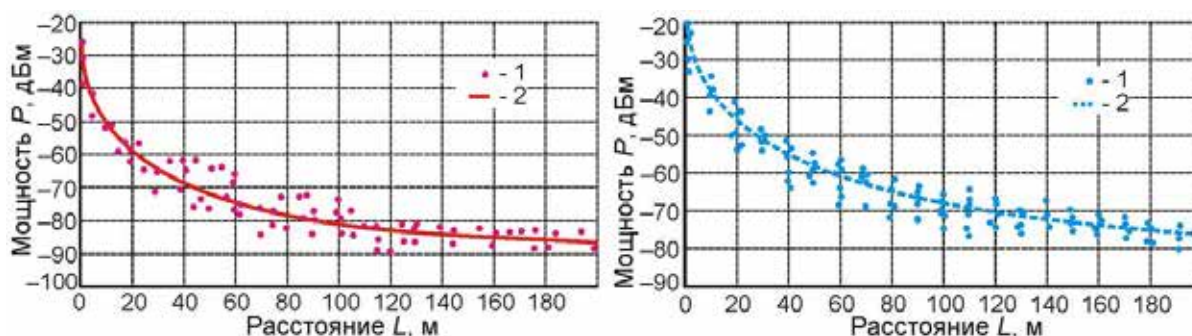
1 – компьютер; 2 – анализатор спектра; 3 – XBee модуль (приемник);
4 – XBee-модуль (передатчик); 5 – RFID-датчик; 6, 7 – таймер



а)

б)

Рис. 5. Выполнение экспериментальных исследований:
а – установка датчиков; б – установка приемника



а)

б)

Рис. 6. Результаты экспериментальных исследований:
а – рассеивание радиоволн в сосновом лесу; б – рассеивание радиоволн в березовом лесу;
1 – экспериментальная зависимость; 2 – теоретическая зависимость

Заключение

Подытоживая сказанное, можно заключить, что предложенная модель учитывает все основные параметры лесной среды, конструкции радиочастотных устройств, климатические факторы и является достаточно адекватной, что подтверждено результатами, полученными экспериментально.

Библиографический список

1. Зависимость падения мощности сигнала от параметров лесной среды при радиочастотном мониторинге лесного фонда / С. П. Санников, В. В. Побединский, И. В. Бородулин, М. А. Черницын, Н. С. Кузьминов // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 4. – С. 181–187.
2. Пат. 2492891 Российская Федерация, МПК А62С 37/00 С1. Система обнаружения лесного пожара / Лисиенко В. Г., Санников С. П.; заявитель и патентообладатель Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т. – № 2012117204/12; заявл. 26.04.2012; опубл. 20.09.2013, Бюл. № 26. – 3 с.
3. Магазинникова, А. Л. Статистические методы расчета УКВ полей в лесных районах: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03 / Магазинникова А. Л. – Томск, 1998. – 23 с.
4. Исмару, А. Распространение и рассеивание волн в случайно-неоднородных средах: в 2 т. / А. Исмару. – М.: Мир, 1981.

5. Иванов, В. Б. Теория волн : курс лекций / В. Б. Иванов. – Иркутск : Иркут. ун-т, 2006. – С. 76.
6. Лавров, В. М. Теория электромагнитного поля и основы распространения радиоволн / В. М. Лавров ; под. ред. И. Г. Кляцкина. – М. : Связь, 1964. – 368 с.
7. Яковлев, О. И. Распространение радиоволн : учебник / О. И. Яковлев, В. П. Якубов, В. П. Урядов, А. Г. Павельев ; под ред. О. И. Яковлева. – М : ЛеНАНД, 2009. – 496 с.

Санников Сергей Петрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра автоматизации
производственных процессов,
Уральский государственный
лесотехнический университет
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37)
E-mail: ssp-54@mail.ru

Sannikov Sergey Petrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of automation
of production processes,
Ural State Forestry Technical University
(37 Sibirskiy trakt street, Ekaterinburg, Russia)

Побединский Владимир Викторович

доктор технических наук, профессор,
кафедра сервиса и технической эксплуатации,
Уральский государственный
лесотехнический университет
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37)
E-mail: pobed@e1.ru

Pobedinskiy Vladimir Viktorovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of service and technical operation,
Ural State Forestry Technical University
(37 Sibirskiy trakt street, Ekaterinburg, Russia)

Побединский Андрей Анатольевич

соискатель,
кафедра автоматизации
производственных процессов,
Уральский государственный
лесотехнический университета
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37)
E-mail: pobed@e1.ru

Pobedinskiy Andrey Anatol'evich

applicant,
sub-department of automation production processes,
Ural State Forestry Technical University
(37 Sibirskiy trakt street, Ekaterinburg, Russia)

УДК 630.52:587/588

Санников, С. П.

Модель рассеивания радиоволн в лесной среде / С. П. Санников, В. В. Побединский, А. А. Побединский // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 39–48.
DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-6.

ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

УДК 531.768.004.9

DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-7

А. С. Баранов

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

A. S. Baranov

MODERN TECHNOLOGY OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS DESIGN

Аннотация. Актуальность и цели. Российский рынок микроэлектромеханических систем (МЭМС-устройств) заполнен импортными датчиками и приборами, что показывает отсутствие массового потребителя данной продукции и, следовательно, невостребованность данной технологии в России. Целью работы является теоретическое исследование с применением современных программных средств процесса разработки инерциальных МЭМС-устройств. **Материалы и методы.** Для определения и оценки будущих выходных характеристик разрабатываемой конструкции чувствительного элемента (ЧЭ) МЭМС-акселерометра применено имитационное моделирование в программном обеспечении ANSYS. **Результаты.** Представлены аналитические расчеты и результаты имитационного моделирования воздействия ускорения на ЧЭ и определены резонансная частота элемента и максимальное перемещение инерционной массы. **Выводы.** Выходные характеристики разрабатываемого ЧЭ соответствуют ожидаемым, следовательно тип данной конструкции возможно использовать для дальнейшей разработки МЭМС-акселерометра.

Abstract. Background. The Russian market of microelectromechanical systems (MEMS devices) is filled by foreign sensors and devices, what shows an absence of the mass consumer on given products and owing to undemanding of this technology in Russia. The aim of work is a theoretical research with use of modern software for design process of inertial MEMS devices. **Materials and methods.** For definition and estimation of future output characteristics of developed sensitive element for MEMS accelerometer, the application of imitating modelling in software ANSYS were considered. **Results.** Analytical calculations and the results of imitating modeling of acceleration influence on sensitive element are presented and resonant frequency of element and maximum movement of inertial weight is defined. **Conclusions.** Output characteristics of developed sensitive element correspond to expectations, and, hence, the type of the given design should be used for further development of MEMS accelerometer.

Ключевые слова: проектирование МЭМС, имитационное моделирование, ANSYS, акселерометр.

Key words: MEMS-design, imitating modelling, ANSYS, accelerometer.

Исторически сложилось так, что датчикоостроение, получившее свое развитие с развитием авиации и ракетной техники, базируется на технологиях, хорошо зарекомендовавших себя в отраслях с массовым производством изделий. Так, в датчикоостроении в прошлом столетии основными технологиями акселерометрии являлись технологии точной механики, отработанные при производстве часов и других точных механизмов. В процессе стремительного развития микроэлектроники стало очевидным, что используемые при этом технологии могут быть с успехом применены в других отраслях техники.

В начале 80-х гг. прошлого столетия появились металлопленочные и емкостные датчики, где клеевые и механические соединения заменялись напыленными пленками. В это же время начали широко использоваться гибридно-пленочные технологии при производстве измерительных цепей. За счет применения пленочных технологий частично улучшались массогабаритные и метрологические характеристики акселерометров, но их радикальному улучшению препятствовали ограниченные возможности технологий механообработки в части формирования микрозазоров, микротолщин и микроплощадок.

В это время к существенному улучшению метрологических характеристик приводит использование материалов, применяемых в электронной промышленности, например оптически чистого плавленого кварца, отличающегося идеальными упругими свойствами [1, 2].

Разработаны и до настоящего времени широко используются акселерометры с магнитоэлектрическим уравниванием серий QA (США), МА (Япония), АЛЕ (РФ). Они отличаются высокой точностью, но не в полной мере отвечают требованиям времени по массогабаритным и энергетическим характеристикам.

Технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) или поверхностной микромеханики позволяют интегрировать датчик и измерительную цепь на едином кристалле небольшой площади. Отличительной особенностью поверхностных микромеханических конструкций является также и то, что при уменьшении габаритных размеров они сохраняют свои механические прочность и устойчивость пропорционально степени уменьшения толщины подвижных элементов датчика перемещения. А это приводит к необходимому созданию принципиально новых технологических линеек, которые могут быть окуплены только при массовом востребованном производстве МЭМС-продукции, что возможно далеко не в каждой стране. Подтверждением является то, что акселерометры на основе поверхностной микромеханики в массовом производстве общепринятого применения – автомобилей, смартфонов и другой электроники, созданы только в США, Японии, Китае и Корее. Пример выполнения инерционного элемента в акселерометре [3, 4] фирмы Analog Devices схематически показан на рис. 1, конструкция разрабатываемого чувствительного элемента (ЧЭ) – на рис. 2.

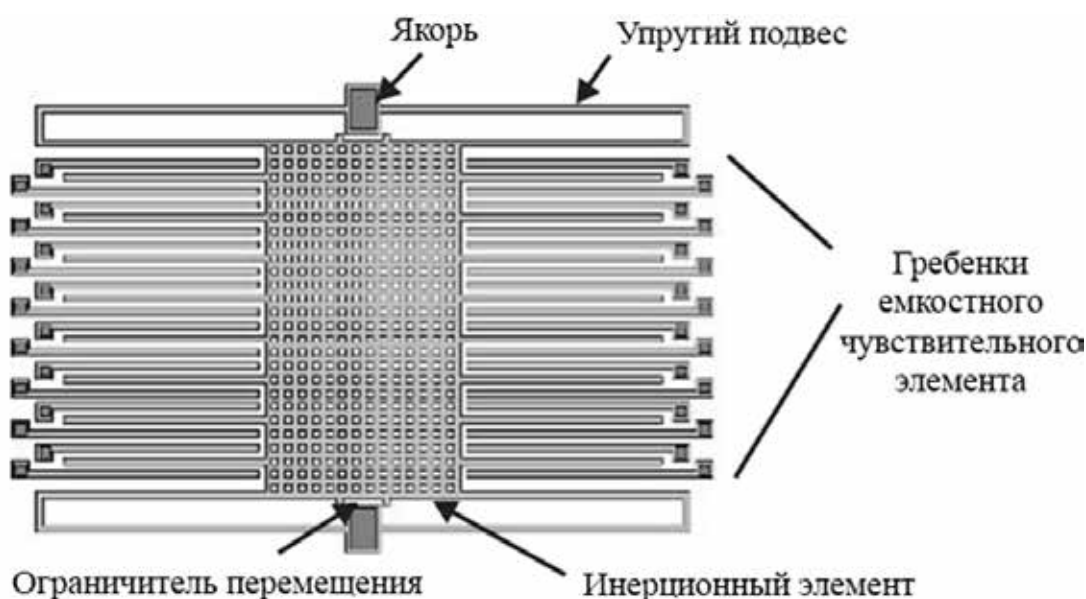


Рис. 1. Колебательная система акселерометра, выполненная методами поверхностной обработки кремния

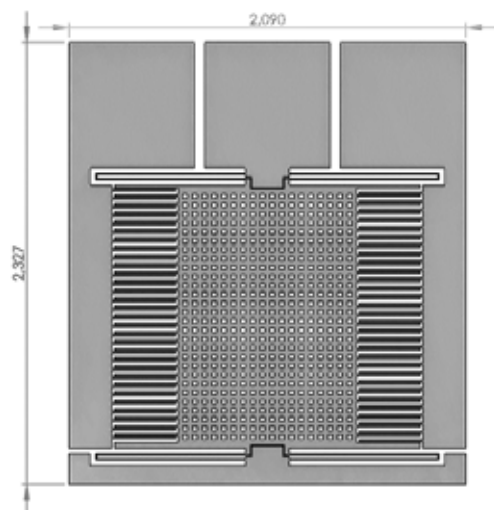


Рис. 2. Модель ЧЭ акселерометра, выполненного методами поверхностной обработки кремния

К технологическим процессам МЭМС с полным основанием относятся технологические процессы сборки ЧЭ [5]. Принципы соединения кремниевого кристалла с другими элементами конструкции зависят от материала, из которого они выполнены. Как правило, для объемных микромеханических акселерометров ЧЭ представляют собой конструкции из чередующихся слоев кремния и стекла (рис. 3), соединение осуществляется методом анодной или электростатической сварки [6, 7]. Метод основан на ионизации содержащихся в стекле молекул натрия под действием высокой температуры в сочетании с постоянной отрицательной разностью потенциалов, прикладываемой к внешним поверхностям стекла и кремния при одновременном механическом поджатии пластин друг к другу. При использовании электростатического соединения необходимо помнить о влиянии контактных деформаций на метрологические характеристики акселерометра. Здесь приемлемы компромиссные решения, основанные на минимизации площадей контактов при одновременном обеспечении требуемой прочности соединения.

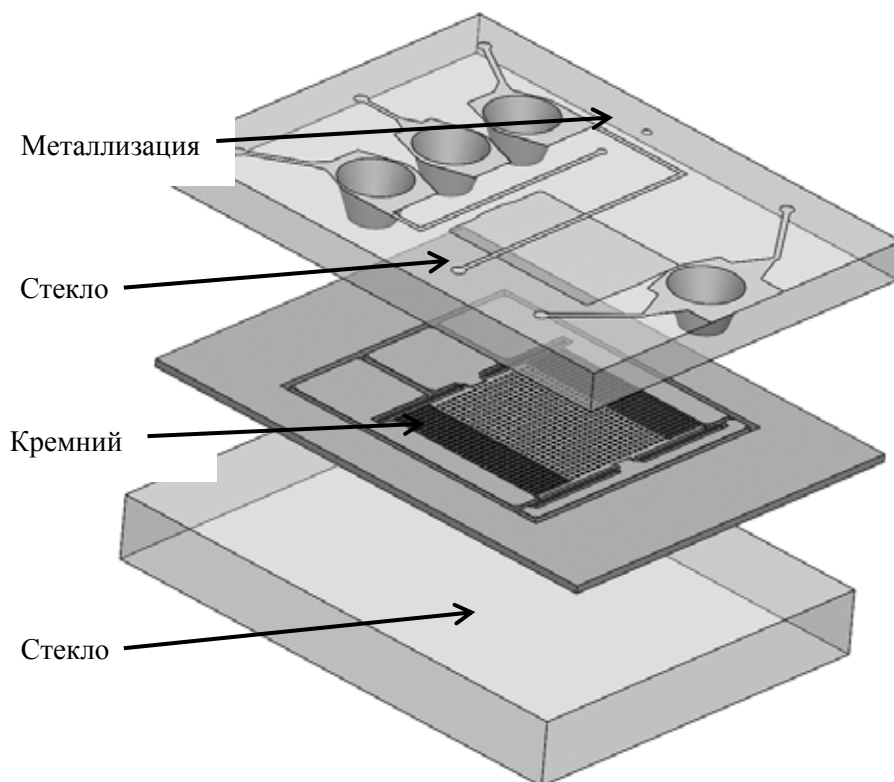


Рис. 3. Детали ЧЭ объемного микромеханического акселерометра

Для предварительной оценки будущего изделия АО «НИИФИ» успешно применяет методы современных CALS-технологий [8], т.е. технологию имитационного моделирования в САЕ-программах. Эта технология позволяет провести расчет влияния внешних воздействующих факторов на конструкцию будущего изделия. В данном случае был использован модальный и статический анализы программы ANSYS [9].

Предварительные аналитические расчеты показали [10], что при жесткости упругих подвесов 7,27 и массе равной $1,768 \cdot 10^{-7}$ расчетная величина резонансной частоты равна

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{7,27}{1,77 \cdot 10^{-7}}} = 1019,1 \text{ Гц.}$$

Сравнивая это расчетное значение со значением резонансной частоты, полученной в результате проведения модального анализа, которая составляет 992,21 Гц (рис. 4), получаем, что погрешность расчета составляет $\sim 2,8 \%$, что является допустимым значением.

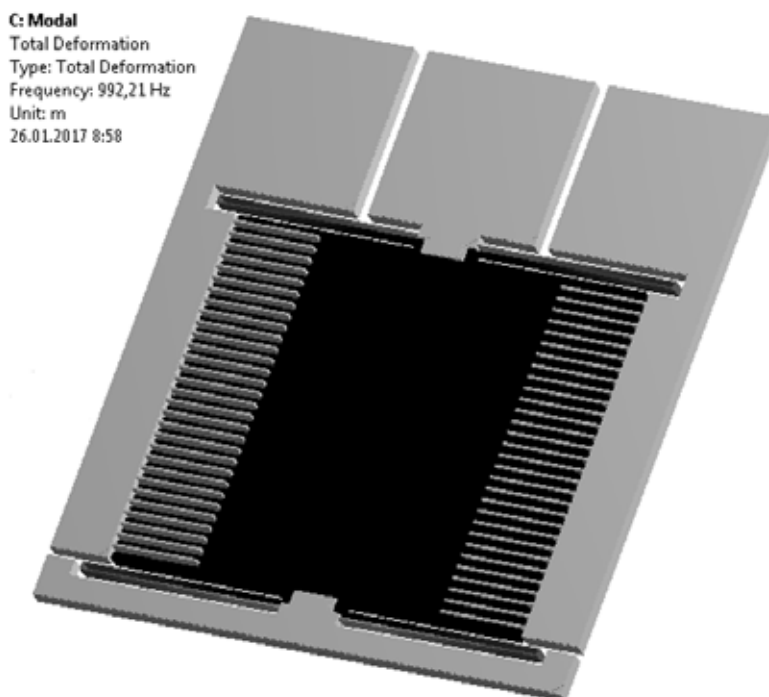


Рис. 4. Мода колебаний, совпадающая с направлением перемещения инерционной массы в процессе работы и соответствующая частоте 992,21 Гц

Далее рассчитываем относительный коэффициент демпфирования, необходимый для более точного определения перемещения инерционного элемента под воздействием внешних сил.

Относительный коэффициент демпфирования рассчитываем по формуле

$$\varepsilon = \frac{b}{2\sqrt{Mk}}; \quad b = n\mu \frac{h^3 a}{d^3},$$

где b – абсолютный коэффициент демпфирования; M – масса инерционного элемента; k – жесткость упругого подвеса; n – количество пар гребенок; μ – вязкость среды (воздуха); h , a – высота и длина зуба; d – зазор между обкладками (между гребенками).

Получаем относительный коэффициент демпфирования, равный 0,015, и используем его при расчете перемещения инерционной массы под воздействием нагрузки.

Проведение статического анализа воздействия на чувствительный элемент ускорения 200 м/с^2 (рис. 5) позволило определить максимальное (с учетом демпфирования) перемещение, которое равно 3,8 мкм.

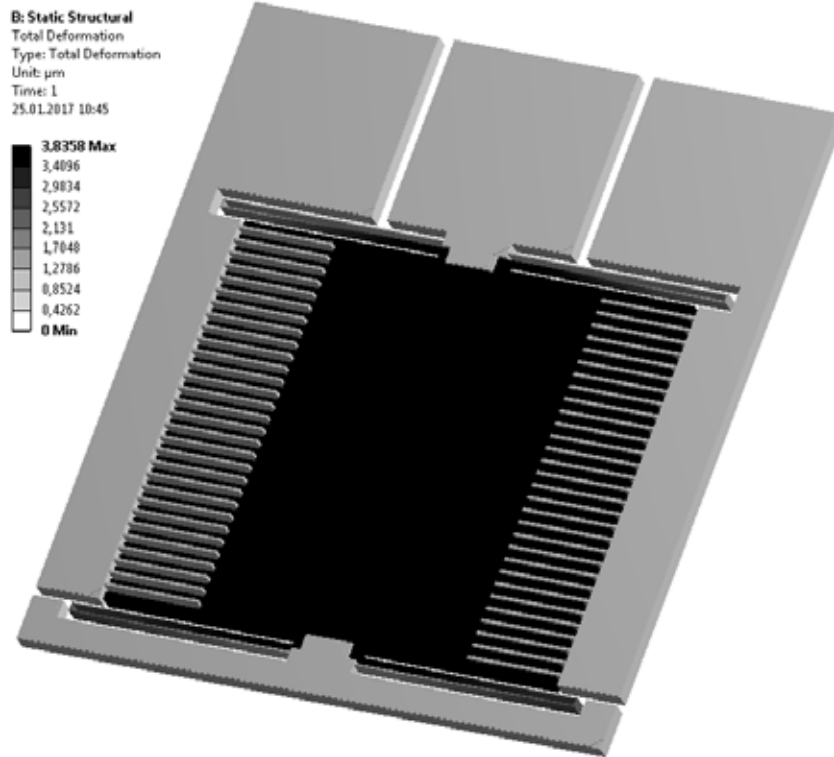


Рис. 5. Эпюра перемещения инерционной массы под воздействием ускорения 200 м/с^2

Полученные результаты показывают высокую точность имитационного моделирования и позволяют дать предварительную оценку работоспособности рассмотренной конструкции. Использование CALS-технологий в процессе проектирования МЭМС позволяет быстро и с высоким уровнем точности оценить предполагаемую работу будущего изделия. Результаты моделирования будут использоваться на следующих этапах разработки МЭМС-акселерометра и сравниваться с результатами экспериментов после изготовления опытного образца, что позволит оценить точность выполненных расчетов и при необходимости усовершенствовать конструкцию для получения наилучших выходных характеристик датчика.

Библиографический список

1. Урманов, Д. М. Концепция развития производства МЭМС-изделий в России на период до 2017 г. / Д. М. Урманов // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 65
2. Распопов, В. Я. Микромеханические приборы : учеб. пособие / В. Я. Распопов. – М. : Машиностроение, 2007. – 400 с.
3. Beeby, S. MEMS Mechanical Sensors / S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White. – Norwood : Artech House Inc., 2004. – 269 с.
4. Коноплев, Б. Г. Компоненты микросистемной техники / Б. Г. Коноплев, И. Е. Лысенко. – Таганрог : Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – Ч. 1. – 117 с.
5. Варадан, В. ВЧ МЭМС и их применение / В. Варадан, К. Виной, К. Джозе. – М. : Техносфера, 2004. – 528 с.
6. Dziuban, J. A. Bonding in Microsystem Technology / J. A. Dziuban. – Netherlands : Springer, 2006. – 331 с.
7. Блинов, А. В. Интегральный датчик давления, ускорения, температуры на базе МЭМС-технологий / А. В. Блинов, А. Е. Мишанин, С. А. Москалев, И. В. Ползунов // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 10.
8. Дмитриенко, А. Г. Центр проектирования унифицированных микроэлектронных датчиков для работы в особо жестких условиях эксплуатации / А. Г. Дмитриенко, А. В. Блинов, И. Н. Барин, Р. Ш. Мусаев // Датчики и системы. – 2012. – № 10. – С. 43.
9. Баранов, А. С. Повышение прочностных и эксплуатационных характеристик системы телеметрии посредством проведения имитационного моделирования механического

- удара / А. С. Баранов, М. А. Фролов, Р. Ш. Мусаев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 1 (7). – С. 88.
10. Gad-el-Hak, M. The MEMS Handbook. MEMS Applications / M. Gad-el-Hak. – Boca Raton : Taylor & Francis Group, LLC, 2006. – 547 с.

Баранов Александр Сергеевич

аспирант, инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: Kamitte11@gmail.com

Baranov Aleksandr Sergeevich

postgraduate student, engineer-constructor,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 531.768.004.9

Баранов, А. С.

Современные технологии проектирования микроэлектромеханических систем / А. С. Баранов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 49–54.
DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-7.

М. С. Ларкин, А. В. Поспелов

КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ СМЕЩЕНИЯ НУЛЯ УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ ТАНГАЖА И КРЕНА «УИТК»

M. S. Larkin, A. V. Pospelov

COMPENSATION FOR THE TEMPERATURE INSTABILITY OF THE ZERO OFFSET UNIT OF MEASUREMENT OF PITCH AND ROLL UITK

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассмотрена конструкция устройства измерения углов тангажа и крена производства АО «НИИФИ». Одной из проблем устройства является неустойчивость выходных значений в зависимости от температуры. Предметом исследования является температурная неустойчивость устройства измерения углов тангажа и крена. **Материалы и методы.** Рассмотрены варианты уменьшения температурной неустойчивости устройства измерения углов тангажа и крена за счет изменения конструкции устройства, оснастки и коррекцией выходных значений в микроконтроллере, входящем в конструкцию устройства. **Результаты.** Расчетным и опытным путем было подтверждено уменьшение температурной неустойчивости устройства. **Выводы.** Подтверждено снижение температурной неустойчивости устройства измерения углов тангажа и крена за счет изменения конструкции устройства, оснастки и коррекции выходных значений.

A b s t r a c t. Background. We consider the construction of angles measurement device pitch and roll production of JSC "NIIFI". One of the problems with the device is the instability of output values depending on the temperature. The subject of research is the temperature instability measurement device pitch and roll angles. **Materials and methods.** Considered the option reduce temperature instability measurement devices, pitch and roll angles due to changes in device design, tooling and correction of output values in the microcontroller, which is part of the unit. **Results.** Calculated and experimentally was confirmed by reducing the thermal instability of the device. **Conclusions.** Confirmed by reducing temperature instability measurement devices, pitch and roll angles due to changes in device design, tooling and correction of output values.

К л ю ч е в ы е с л о в а: устройство измерения углов тангажа и крена, температурная неустойчивость.

Key words: flow measuring device pitch and roll angles, temperature instability.

Датчик угла наклона широко используется в различных областях техники для обеспечения возможности ориентации объектов относительно вектора гравитационного поля Земли. Существует множество так называемых жидкостных уровней, в которых индуктором угла положения служит пузырек воздуха. Их основным недостатком является невозможность использования в широком диапазоне температур. Для подобных условий разрабатываются электрон-

ные уровни, в основе построения которых лежит использование емкостных акселерометров или гироскопов.

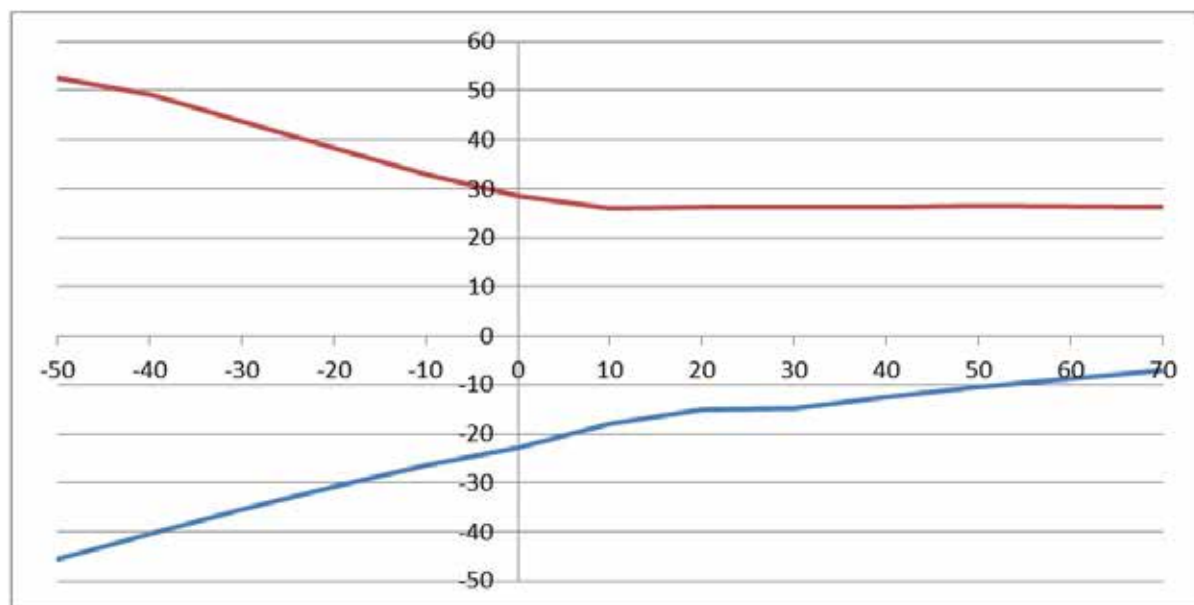
Современное развитие микромеханики позволило конструировать миниатюрные твердотельные акселерометры, существенно превосходящие по многим характеристикам гироскопы, что и определило приоритетность их использования в уровнях и датчиках углов наклона.

Акселерометры представляют собой датчики линейного ускорения и в этом качестве широко используются для измерения углов наклона тел, сил инерции, ударных нагрузок и вибрации. В отличие от традиционных датчиков угла, использование акселерометра не требует механической связи между чувствительным элементом и подвижным основанием. Акселерометры измеряют углы наклона конструкций относительно вектора гравитационного ускорения g на основе энергетического взаимодействия с ним. При измерении углов тангажа и крена два акселерометра со взаимно перпендикулярными измерительными осями измеряют проекции вектора гравитационного ускорения [1].

Основными частями устройства измерения углов тангажа и крена УИТК производства АО «НИИФИ» являются два акселерометра типа АЛЕ и микроконтроллер серии 1986ВЕ9х, обеспечивающий цифровой канал для приема и передачи данных. Устройство разрабатывается в двух вариантах с диапазоном измерения 3° и 6° . Абсолютное значение среднеквадратической погрешности измерений для каналов тангажа и крена не более ± 20 угл. мин для исполнения с диапазоном измерения 3° и ± 40 угл. мин для исполнения с диапазоном измерения 6° .

В процессе испытаний УИТК определялась стабильность смещения нуля в интервале изменения температуры окружающей среды от -50 до $+70$ $^\circ\text{C}$. Для производства испытаний устройство закрепляется на установочной плоскости, зафиксированной в делительной головке в камере тепла и холода, в камере устанавливается требуемое значение температуры, после ее набора производится запись выходных данных устройства в горизонтальном положении.

Испытания показали, что в устройстве происходит смещение нуля при изменении температуры окружающей среды ($\approx 1,4$ угл. мин). График зависимости смещения нуля от температуры представлен на рис. 1.



— смещение нуля по каналу крена; — смещение нуля по каналу тангажа

Рис. 1. Зависимость смещения нуля от изменения температуры:
ось X – значение температуры ($^\circ\text{C}$); ось Y – смещение нуля (угл. секунд)

Анализ данной проблемы позволил выявить факторы, влияющие на смещение нуля:

- 1) изменение геометрических размеров приспособления при изменении температуры окружающей среды;
- 2) нестабильность опорного напряжения;

3) нестабильность выходного напряжения акселерометра.

В процессе испытаний устройства было замечено искажение установочной плоскости плиты от изменения температуры окружающей среды. Для устранения этой причины была изменена конструкция установочного приспособления для оптической делительной головки путем увеличения толщины плиты для установки и крепления устройства.

Проблема нестабильности опорного напряжения была решена путем установки в схему устройства прецизионного стабилизатора.

Несмотря на устранение вышеуказанных факторов, температурная нестабильность устройства выходит за заданные пределы точности.

Известным способом компенсации температурной нестабильности является использование в конструкции датчика температуры, выходной сигнал которого служит исходной информацией для корректировки отклонений значений. Наличие встроенного в микроконтроллер датчика температуры позволяет корректировать нестабильность смещения нуля программным путем. Данная корректировка требует выявления зависимостей смещения нуля от изменения температуры. Проверка на достоверность и стабильность методов коррекции смещения нуля подтверждалась пересчетом исходных данных по выведенным функциям.

Для получения зависимости проводятся первичные измерения, по которым были построены графики. Полученные кривые подвергаются разбиению на более подходящие отрезки для аппроксимации, т.е. по осязательным переломам на графике для каждого канала персонально. Далее полученные отрезки аппроксимируются полиномом со степенью, позволяющей наиболее уменьшить разность между максимальным и минимальным значением.

В первом устройстве с диапазоном измерения 3° осязательный перелом для обоих каналов измерения проявился на $+20^\circ\text{C}$, и дальнейшая аппроксимация позволила повысить точность коррекции смещения нуля до $\approx 0,08$ угл. мин, что полностью удовлетворяет требованиям к устройству. График разбиения, аппроксимирующие кривые и результаты коррекции для устройства № 1 представлены на рис. 2.

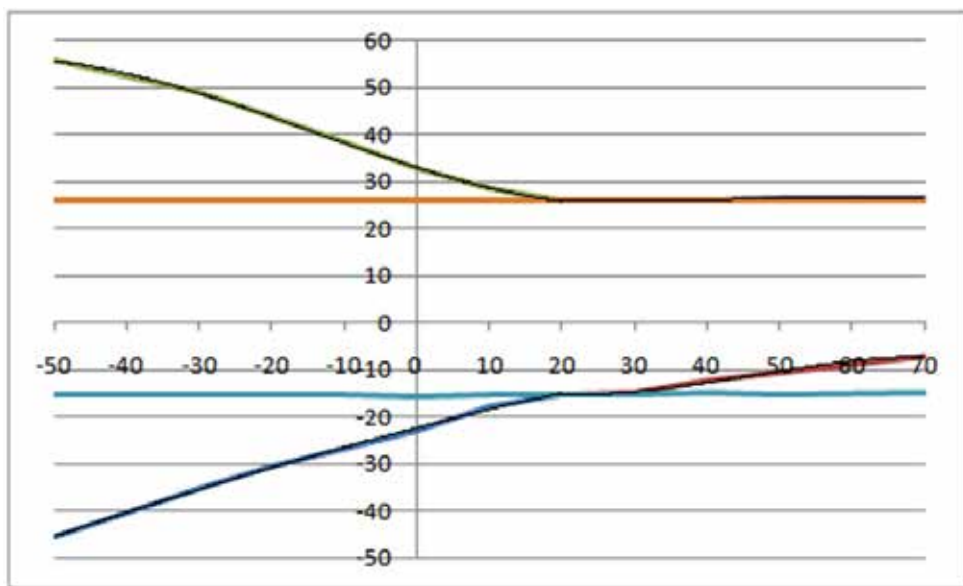


Рис. 2. Зависимость смещения нуля от изменения температуры для устройства № 1

Для подтверждения приемлемости метода для других устройств данный алгоритм был применен на втором устройстве с диапазоном измерения 6° . В данном случае разбиение производилось для канала крена на температуре 0 и $+40^\circ\text{C}$, а для канала тангажа на $+30$ и $+40^\circ\text{C}$. Данное разбиение и аппроксимация полиномом до третьей степени позволило наиболее минимизировать разницу между максимумом и минимумом и повысить точность коррекции смещения нуля до $\approx 0,3$ угл. мин, что также удовлетворяет требованиям к устройству. График разбиения и аппроксимирующие кривые для второго устройства представлены на рис. 3.

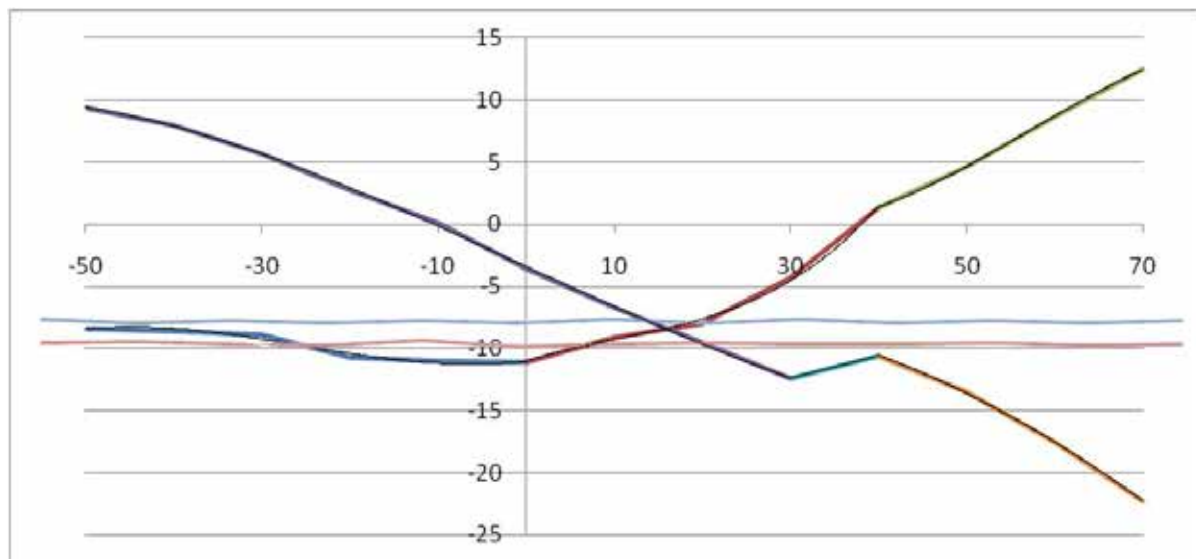


Рис. 3. Зависимость смещения нуля от изменения температуры для устройства № 2

Для реализации метода в программу микроконтроллера устройства вносятся коэффициенты коррекции на заданных температурных диапазонах с последующим экспериментальным подтверждением эффективности коррекции. Подтверждено, что предложенный метод коррекции обеспечивает уменьшение нестабильности смещения нуля более чем на порядок, что позволяет применять в дальнейшем метод температурной компенсации полиномом n -й степени на других устройствах для коррекции смещения нуля.

Заключение

Изменения в конструкции приспособления и устройства, а также коррекция полиномом n -й степени, зависящим от температуры, позволило максимально приблизить смещение нуля к минимуму, что делает стабильным устройство измерения тангажа и крена при изменении температуры окружающей среды и повышает точность измерений.

Библиографический список

1. Пospelов, А. В. Системы горизонтирования и наведения подвижных объектов на основе прецизионных акселерометров / А. В. Пospelов, Е. А. Макаров, Д. А. Скаморин // Информационно-управляющие и измерительные системы – 2016 : тезисы докладов Отраслевой науч.-техн. конф. приборостроительных организаций Роскосмоса. – Королев, 2016. – С. 114–116.

Ларкин Максим Сергеевич

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: inercial@niifi.ru

Larkin Maksim Sergeevich

design engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Пospelов Алексей Владимирович

главный специалист,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: inercial@niifi.ru

Pospelov Aleksey Vladimirovich

chief specialist,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 531.717.35

Ларкин, М. С.

Компенсация температурной нестабильности смещения нуля устройства измерения углов тангажа и крена «УИТК» / М. С. Ларкин, А. В. Поспелов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 55–59. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-8.

В. А. Шокоров

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ
И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

V. A. Shokorov

**DEVELOPING AND APPLICATION OF PRESSURE
AND TEMPERATURE SENSORS BASED ON
MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS
FOR PART SPACE-AND-ROCKET ENGINEERING**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Предметом исследования являются полупроводниковые датчики давления и температуры. Целью работы является разработка распределенных датчиков давления и температуры на основе микроэлектромеханических систем для изделий ракетно-космической техники, работающих при повышенных значениях внешних воздействующих факторов. **Материалы и методы.** Обоснована целесообразность применения определенных конструкционно-технологических решений. **Результаты.** Приведена разработанная конструкция датчика. Проведены патентные исследования, подтверждающие новизну применения разработанных конструктивно-технологических решений. **Выводы.** Предложенная авторами конструкция полупроводникового датчика давления и температуры позволит увеличить надежность и полезную нагрузку космического аппарата; технические и метрологические характеристики датчика не уступают отечественным и зарубежным аналогам, а по некоторым показателям даже превосходят их.

A b s t r a c t. Background. The subject of this study is semiconductor pressure sensors and temperature. The aim of this work is to develop a distributed pressure sensors and temperature based on microelectromechanical systems for space hardware operating at high values of the external influencing factors. **Materials and methods.** The expediency of application of certain structural and technological solutions. **Results.** Given the developed design of the sensor. Conducted patent research proving the novelty of the application of developed technological solutions. **Conclusions.** The proposed construction of a semiconductor pressure sensor and temperature will increase the reliability and the payload of the spacecraft, technical and metrological characteristics of the sensor are not inferior to domestic and foreign analogues, and on some parameters even surpass them.

К л ю ч е в ы е с л о в а: датчик давления и температуры, базовые несущие конструкции, микроэлектромеханическая система, чувствительный элемент, метрологические характеристики, полиимидный шлейф.

Key words: pressure and temperature sensor, the basic load-bearing structures, microelectromechanical system, sensing element, metrological characteristics, polyimide loop.

Введение

Рынок по предоставлению космических услуг является динамично развивающейся отраслью мировой экономики и, как следствие, услуги по разработке, запуску и обслуживанию космических аппаратов (КА) различного назначения становятся более востребованным. Мировые тенденции создания и пусков КА показывают ежегодное увеличение поднимаемой массы полезной нагрузки и различных видов исследовательского оборудования с одновременным увеличением срока активного существования, что вполне объяснимо с точки зрения снижения затрат на запуск ракет-носителей, КА, развертывание группировок спутников и космических обсерваторий, а также обслуживание международной космической станции.

В настоящее время активно ведутся работы в области проектирования и создания нового поколения бортовых систем, панелей приборов для спутников, космических аппаратов, ракет-носителей и космических обсерваторий, имеющих улучшенные тактико-технические характеристики, наподобие ГЛОНАСС-К, «Экспресс-АМ44», «Экспресс-МД-2», ракет-носителей семейства «Ангара», «Спектр-УФ» [1–3].

Одним из основных материалов в данных аппаратах для производства комплексных функционально-интегрированных композитных базовых несущих конструкций (БНК) является углепластик. Его главные преимущества: это малая плотность, высокие прочностные и жесткостные свойства, низкий коэффициент линейного термического расширения. Для получения оптимально спроектированной БНК из композитного материала (КМ) необходимо комплексное понимание влияния и точный контроль технологических факторов (режимы отверждения, термообработки, режимы газофазного осаждения и т.п.) на физико-механические и теплофизические свойства формируемого КМ. Для обеспечения эффективной длительной работоспособности БНК из КМ требуется контролировать не только технологические параметры изготовления, но и режимы эксплуатации [4].

Анализ предъявляемых требований к датчикам

Возможность подробного контроля и диагностики изделий ракетно-космической техники, а также отдельных параметров технологических процессов получения конструкций из КМ и состояния конструктивных элементов под влиянием внешних воздействующих факторов обеспечивается встраиванием в конструктивные элементы БНК системы распределенных датчиков, которые выполняют непосредственное преобразование величины внешних воздействующих факторов в электрический выходной сигнал (рис. 1). Электрический сигнал от нескольких распределенных по объекту измерения датчиков по аналоговым интерфейсам стекается в систему первичной обработки информации, в которой сигналы от датчиков преобразуются в унифицированный цифровой сигнал и затем по стандартным цифровым протоколам передачи данных поступают на блок обработки информации.

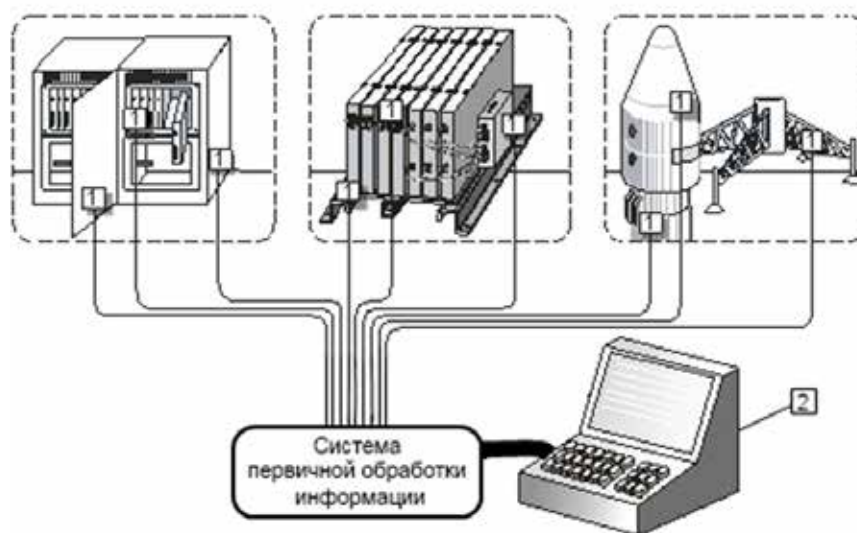


Рис. 1. Схема сбора информации: 1 – распределенные датчики; 2 – блок обработки информации

Данное конструктивно-технологическое решение позволяет осуществлять измерение в системах оперативного контроля внешних условий полета космических аппаратов и идентификации аварийных и катастрофических ситуаций на борту летательных аппаратов, системах оперативного определения пробоя техногенной частицей гермоотсеков международной космической станции и космических аппаратов.

Важное условие, предъявляемое к датчикам, – малые габариты и масса, так как их общее количество на одном изделии, особенно при стендовой и летно-конструкторской отработке, очень велико и может достигать нескольких сотен, что связано с большим числом контролируемых параметров и точек контроля [5].

В случае распределенного размещения датчиков непосредственно в БНК без изменения ее конструкции необходимо выполнение следующих требований:

- размер датчиков, внедряемых в объем материала, может быть не более $300 \times 300 \times 300 \text{ мкм}^3$ для минимизации искажения ячейки в связи с тем, что структурная ячейка материала имеет характерные размеры на уровне 200–300 мкм;

- наличие подводящих каналов для съема информации нежелательно;

- химическая инертность к компонентам БНК в широком диапазоне температур.

В случае распределенного размещения датчиков на поверхности БНК необходимо выполнение ряда условий:

- геометрические размеры определяются на основе компоновочно-геометрических и функциональных параметров всей конструкции, составной частью которой является КМ, и геометрических особенностей выбранной детали из КМ;

- датчики, компоненты БНК и подводящие каналы (при их наличии) должны быть химически инертны в широком диапазоне температур;

- температура работоспособности без искажения сигнала должна быть не менее 200 °С [4].

К метрологическим характеристикам датчиков предъявляются повышенные требования:

- погрешность в условиях эксплуатации не более 0,5 %;

- долговременная стабильность выходного сигнала не хуже 0,15 % в год;

- нормирующее значение выходного сигнала не менее 90 мВ;

- температурное смещение нуля $\pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$.

В процессе вывода изделий ракетно-космической техники на орбиту датчики подвержены следующим воздействиям:

- линейные перегрузки: продольная до $(\pm 10) g$, боковая до $(\pm 2) g$ в течение 10 мин по каждой оси;

- вибрационные перегрузки в диапазоне от 10 до 2500 Гц с ускорениями соответственно от 1 до 10 g. Суммарное действие по каждой оси – до 15 мин;

- ударные перегрузки в любом направлении до 40 g при длительности от 0,5 до 2 мс и количестве по пяти ударов в каждом направлении (всего 30 ударов по трем осям во взаимно противоположных направлениях).

Датчики должны удовлетворять вышеперечисленным требованиям и быть работоспособными в течение не менее 15 лет.

Реализация возможных методов решения

Реализация датчиков с предъявляемыми к ним требованиями при помощи традиционных методов изготовления (тонкопленочный, емкостный, индуктивный) невозможна. Выполнение данной задачи возможно только с применением микроэлектромеханических систем (МЭМС), которые вобрала в себя все достижения микроэлектронной промышленности (материалы, оборудование, средства проектирования и т.д.). МЭМС-технологии позволяют создавать в едином технологическом цикле миниатюрные датчики, способные измерять в одной точке сразу несколько физических величин [6] и таким образом повысить информативную насыщенность о контролируемых параметрах, что предоставляет возможность их использования в системах распределенного контроля.

В рамках опытно-конструкторской работы (ОКР) «Разработка распределенного измерительного функционального модуля давления и температуры на основе наноэлектромеханических систем для встраивания в базовые несущие конструкции изделий ракетно-космической

техники и объектов наземной космической инфраструктуры» была проведена разработка распределенных датчиков давления и температуры на основе МЭМС. В ходе анализа выявлены следующие уникальные свойства датчиков, разработанных по данной технологии:

- миниатюрность размеров упругих элементов ($1000 \times 1000 \times 1000$ мкм), определяющая их малую механическую инерционность, из-за чего они имеют хорошие частотные свойства и малую чувствительность к механическим перегрузкам;

- методы обработки кремния позволяют выполнять детали и узлы исполнительных устройств с линейными размерами порядка 10 мкм с точностью ± 1 мкм, что недоступно для других конструкционных материалов (сталь, керамика, стекло и пр.) [7];

- возможность изготовления при помощи МЭМС-технологий приборов в виде монолитной конструкции (реализация принципа «самосборки»), что решает проблему сложности и высокой стоимости процесса установки и закрепления миниатюрных упругих элементов (мембран, балок) [7];

- возможность изготовления чувствительных элементов датчика, измеряющих несколько параметров (давление, температура, перемещение и др.) на одном кристалле [6];

- возможность нанесения пассивирующего слоя, позволяющего избавиться от загрязнений мембраны чувствительного элемента, появления миграционных потоков, вызванных воздействием окружающей среды на топологическую схему;

- микроэлектронная технология и использование поликристаллического кремния для чувствительных элементов определяют их более высокую надежность по сравнению с чувствительными элементами, изготовленными по традиционным методам.

Исходя из требований, необходимых для встраивания в БНК из КМ, можно сказать, что с существующими в России технологиями изготовление датчиков, внедряемых в объем материала, без искажения ячейки КМ невозможно, однако возможно производить монтаж на поверхности БНК с минимальными потерями пространства внутри КА. Для минимизации массы и объема, занимаемого датчиком, а также для обеспечения возможности распределенного размещения по площади БНК в ходе сравнительного анализа датчиков-аналогов [7] была разработана новая конструкция датчика, обеспечивающего измерение нескольких параметров (рис. 2). Данная конструкция состоит из следующих элементов:

- полупроводниковый чувствительный элемент, непосредственно воспринимающий давление и температуру измеряемой среды. Чувствительный элемент состоит из кристалла 1 с центральной тонкой мембраной, соединенного электростатическим способом в вакууме со стеклянным основанием 2, позволяющим создать вакуумированную полость 3, обеспечивающую измерение абсолютного давления, а также стеклянного изолятора, обеспечивающего изоляцию золотых проводников, и корпуса. С планарной стороны кристалла методом эпитаксиального выращивания наноструктурированного поликристаллического кремния сформированы четыре тензорезистора R1–R4, объединенные в мостовую цепь, терморезисторы R5, R6 обеспечивают термокомпенсацию канала давления и канал температуры. Минимально получаемые размеры чувствительного элемента составляют $1000 \times 1000 \times 1000$ мкм, однако в рамках ОКР он был разработан с размерами $4000 \times 5000 \times 1300$ мкм с выведенными на одну сторону контактными площадками для более удобной коммутации [9];

- плоский полиимидный шлейф, который может быть распределенно размещен на компонентах БНК без потери полезного объема и с минимальной потерей массы в связи с минимальной толщиной шлейфа 100 мкм, а также шириной 1000 мкм. Разработанный шлейф полностью повторяет конструкцию элементов БНК и крепится к элементам БНК при помощи клеевого соединения. Конструкция шлейфа позволяет использовать плоские соединители, а также возможно соединение шлейфа со шлейфом при помощи «флип-чип» технологии.

В ходе выполнения ОКР были проведены патентные исследования, позволяющие сравнить технический уровень разрабатываемого датчика с лучшими по технико-экономическим показателям датчиками зарубежного производства. В качестве аналогов выбраны:

- датчик давления ДДЭ 095 АО «НИИФИ», РФ;
- датчик давления LLE-5DC-500 Kulite, США;
- датчик давления SMD 500 Bosch Sensortec, Германия.

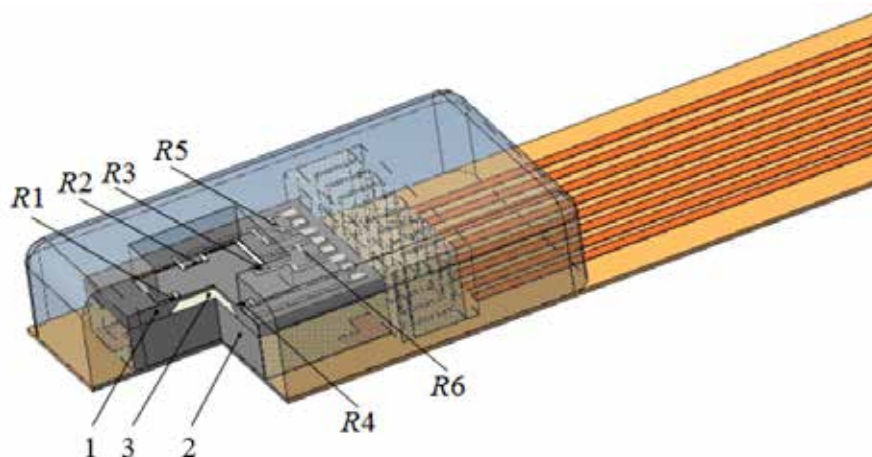


Рис. 2. Модель датчика давления и температуры, изготовленного по МЭМС-технологии

Результаты оценки технического уровня приведены в циклограмме (рис. 3), из которой можно сделать вывод, что технический уровень разрабатываемого датчика выше уровня аналогов ДДЭ 095 АО «НИИФИ», РФ, LLE-5DC-500 Kulite, США и SMD 500 Bosch Sensortec, Германия, по диапазону измерений, диапазону рабочих температур, диапазону измеряемых температур, погрешности измерения температуры.



Рис. 3. Циклограмма сравнительных характеристик разрабатываемого датчика, его аналогов и идеальной датчикопреобразующей аппаратуры

Кроме того, разработанная конструкция датчика имеет ряд преимуществ, отличающих ее от датчиков-аналогов:

- возможность установки на поверхностях металлических и композитных БНК;
- наличие термокомпенсируемого канала давления и канала температуры;

- возможность распределенного размещения датчиков, прокладки кабельных сетей на металлических и неметаллических поверхностях изделий ракетно-космической техники со сложным рельефом;
- малые габариты и масса (менее 1 г);
- высокая радиационная стойкость.

Заключение

Разработка датчика давления и температуры, позволяющего диагностировать изменения основных характеристик БНК, произведена в рамках ОКР «Разработка распределенного измерительного функционального модуля давления и температуры на основе наноэлектромеханических систем для встраивания в базовые несущие конструкции изделий ракетно-космической техники и объектов наземной космической инфраструктуры». Его применение позволит увеличить надежность и полезную нагрузку космического аппарата, а технические и метрологические характеристики не уступают отечественным и зарубежным аналогам, а по некоторым показателям даже превосходят их [5, 7]. Требования, предъявляемые к распределенным датчикам, подтверждены предварительными испытаниями и испытаниями на воздействие радиации до 100 крад. Рабочей конструкторской документации присвоена литера «О».

Библиографический список

1. Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный космический научно-производственный центр им. М. В. Хруничева». – URL: <http://www.khrunichev.ru/>
2. Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» им. академика М. Ф. Решетнева». – URL: <http://www.npopm.ru/>
3. Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение им. С. А. Лавочкина». – URL: <http://www.laspase.ru/>
4. Научно-технический отчет № 0240-98 от 15.06.2012 «Разработка и внедрение базовых технологических процессов изготовления неметаллических элементов базовых несущих конструкций из полимерных композиционных материалов и керамоматричных композиционных материалов с встроенными функционально распределенными измерительными и функциональными модулями», ОАО «Композит». – Королев, 2012.
5. Технические требования к космическому аппарату «Экспресс-АМУ2». – URL: http://www.rscs.ru/files/images/tt_amu2.pdf
6. Блинов, А. В. Интегральный датчик давления, ускорения и температуры на базе МЭМС-технологий / А. В. Блинов, А. Е. Мишанин, С. А. Москалев, И. В. Ползунов // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. – 12.
7. Джексон, Р. Г. Новейшие датчики : пер. с англ. / Р. Г. Джексон. – М. : Техносфера, 2007.
8. Васильев, В. А. Состояние и перспективы создания полупроводниковых микроэлектромеханических систем и датчиков давления на их основе / В. А. Васильев, С. А. Москалев, И. В. Ползунов, В. А. Шокоров // Метрология. – 2014. – № 11. – С. 15–24.
9. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2014630011. Измерительный функциональный преобразователь давления и температуры / Ползунов И. В., Родионов А. А., Шокоров В. А. Зарегистрировано в реестре ТИМС 09.01.2014. Приоритет от 06.11.2013.

Шокоров Вадим Александрович

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: Shokorov58@gmail.com

Shokorov Vadim Aleksandrovich

design engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 531.781.2:629.7

Шокоров, В. А.

Разработка и применение датчиков давления и температуры на основе микроэлектромеханических систем для изделий ракетно-космической техники / В. А. Шокоров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 60–66. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-9.

А. А. Трофимов, Д. А. Рязанцев, Р. М. Тимонин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ НА ДАТЧИК ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

A. A. Trofimov, D. A. Ryazantsev, R. M. Timonin

MODELING OF THE INFLUENCE OF THE LOWERED PRESSURE ON SENSOR OF THE LINEAR DISPLACEMENT

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Целью работы является определение работоспособности датчика линейных перемещений в условиях воздействия пониженного давления методом имитационного моделирования тепловых процессов и экспериментальным определением дополнительной погрешности от воздействия пониженного давления. **Материалы и методы.** Проведено моделирование тепловой модели нагрева элементов конструкции датчика от рассеиваемой мощности электрорадиоизделий. Выполнено экспериментальное подтверждение результатов моделирования с последующей оценкой работоспособности датчика в условиях воздействия пониженного давления по значению дополнительной погрешности. **Результаты.** Приведены результаты расчетов рассеиваемой мощности электрорадиоизделий и показано моделирование тепловых полей при воздействии пониженного давления на датчик линейных перемещений. Разработана 3D-модель датчика. Экспериментально подтверждена правильность конструктивных решений датчика. Определена дополнительная погрешность датчика от воздействия пониженного давления. **Выводы.** Результаты моделирования и экспериментов подтвердили работоспособность исследуемого датчика в условиях воздействия пониженного давления.

A b s t r a c t. Background. The purpose of the work is a determination to capacity to work of the sensor of the linear displacement working in condition of the lowered pressure by way of modeling of the heat processes and experimental determination to additional inaccuracy from influence of the lowered pressure. **Materials and methods.** Organized modeling in the manner of heat model of the heating element to designs of the sensor from diffused powers of electronic components. The Executed piece of evidence result modeling and estimation to capacity to work of the sensor in condition of the influence of the lowered pressure on importance of additional inaccuracy. **Results.** The brought results calculation diffused powers electronic components and modeling by heat flap at influence of the lowered pressure on sensor of the linear displacement. 3D-model of the sensor is designed. Experimental is confirmed correctness of the constructive decisions of the sensor. Additional inaccuracy of the sensor is determined from influence of the lowered pressure. **Conclusions.** The results of modeling and experiment have confirmed capacity to work of the sensor in condition of the influence of the lowered pressure.

К л ю ч е в ы е с л о в а: датчик линейных перемещений, рассеиваемая мощность, тепловая модель датчика, имитационное моделирование, пониженное давление.

К e y w o r d s: sensor of the linear displacement, diffused power, heat model of sensor, simulation modeling, lowered pressure.

Введение

Эффективность систем управления сложными объектами во многом зависит от первичных средств измерения (датчиков). Значительный объем среди них занимают датчики линейных перемещений (ДЛП) [1]. В системах управления ДЛП применяются для определения положений подвижных объектов, кинематических звеньев механических и гидравлических приводов и т.д. При разработке ДЛП следует обращать внимание на работоспособность разрабатываемого датчика в конкретных условиях применения.

Среди основных требований, которые предъявляются к ДЛП, выделяют требование по устойчивости к внешним воздействующим факторам, одним из которых является пониженное давление. Требование по устойчивости к воздействию пониженного давления предъявляется в первую очередь к аппаратуре, применяемой в авиационной и космической отраслях.

При эксплуатации ДЛП в условиях пониженного давления постоянно возникает задача отвода тепла от тепловыделяющих элементов и определения их максимальной температуры. Одними из таких элементов являются электрорадиоизделия (ЭРИ), которые выделяют тепловую энергию, равную рассеиваемой мощности ЭРИ в единицу времени.

Тепловая энергия от ЭРИ распространяется посредством излучения во внешнюю среду и за счет теплопроводности и естественной конвекции. Для бортовой аппаратуры теплообмен в основном происходит за счет теплопроводности [2]. Это вызвано тем, что излучение во внешнюю среду эффективно при высоких температурах более 100–150 °С, а конвективный перенос внутри блока затруднен из-за отсутствия естественной конвекции в условиях пониженного давления. Проверка правильности выбранных конструктивных решений, влияющих на работоспособность аппаратуры в условиях пониженного давления, является актуальной проблемой.

Основная часть

Для подтверждения правильности выбранных конструктивных решений и проверки соблюдения тепловых режимов эксплуатации ЭРИ, влияющих на работоспособность разрабатываемого ДЛП в условиях пониженного давления, выполнен расчет рассеиваемой мощности ЭРИ датчика и проведено имитационное моделирование тепловых потоков, возникающих при его работе.

Конструкция ДЛП в виде 3D-модели представлена на рис. 1, а принцип работы описан в [3]. По условиям эксплуатации ДЛП должен непрерывно работать в течение 7200 с в условиях пониженного давления $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па.

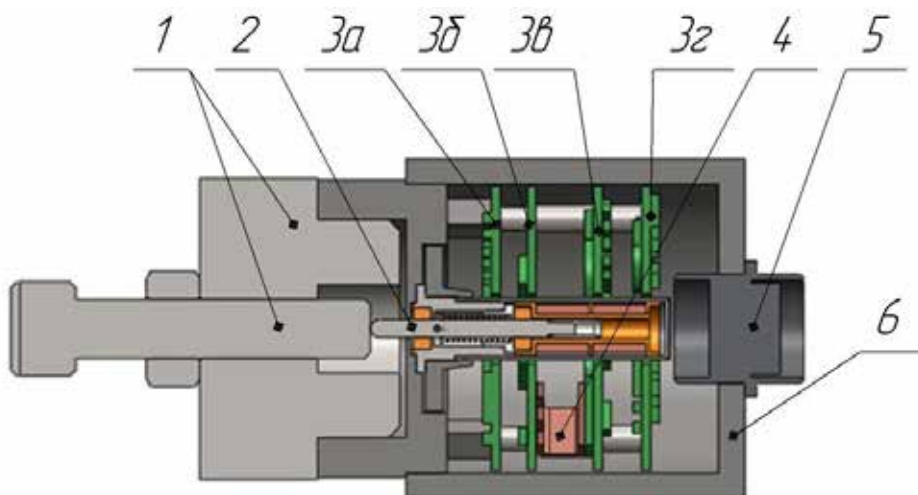


Рис. 1. 3D-модель ДЛП: 1 – приспособление для задания перемещений; 2 – чувствительный элемент; 3 – платы с ЭРИ; 4 – радиатор; 5 – разъем ДЛП; 6 – корпус

ДЛП имеет конструкцию со встроенной электроникой, которая требует расчета тепловых режимов в зависимости от рассеиваемой мощности ЭРИ, находящихся под максимальной электрической нагрузкой. В ДЛП таковыми являются микросхемы линейных интегральных

стабилизаторов напряжения, располагающиеся на плате блока питания. Для линейных интегральных стабилизаторов напряжения рассеиваемая мощность рассчитывается по формуле [4]:

$$P_{\text{рас}} = (U_{\text{доп}} - U_{\text{ВЫХ}})I_{\text{доп}} + U_{\text{доп}}I_{\text{П}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{рас}}$ – мощность рассеивания; $U_{\text{доп}}$ – максимальное (допустимое) входное напряжение; $U_{\text{ВЫХ}}$ – выходное напряжение; $I_{\text{доп}}$ – максимальный (допустимый) ток нагрузки; $I_{\text{П}}$ – ток потребления.

В блоке питания ДЛП расположены два стабилизатора напряжения 142ЕН12 и 142ЕН5А, которые преобразуют напряжение (± 27) В в напряжение (± 5) В и (± 15) В. Полученные в результате расчетов значения рассеиваемой мощности для стабилизаторов напряжения в соответствии с режимами их эксплуатации и техническими условиями [5, 6] приведены ниже.

Для стабилизатора 142ЕН12 рассеиваемая мощность при $U_{\text{доп}} = 28,5$ В, $U_{\text{ВЫХ}} = 17,5$ В, $I_{\text{доп}} = 0,08$ А, $I_{\text{П}} = 0,1$ А равна $P_{\text{рас}} = 3,73$ Вт.

Для стабилизатора 142ЕН5А рассеиваемая мощность при $U_{\text{доп}} = 9$ В, $U_{\text{ВЫХ}} = 5$ В, $I_{\text{доп}} = 0,005$ А, $I_{\text{П}} = 0,01$ А равна $P_{\text{рас}} = 0,11$ Вт.

Рассчитанные значения рассеиваемой мощности не превышают значения, допустимые техническими условиями на них (по ТУ максимально допустимая рассеиваемая мощность микросхем 142ЕН12 и 142ЕН5А равна 9 Вт), следовательно, электрические режимы работы ЭРИ ДЛП соблюдаются.

Даже при соблюдении электрических режимов работы ЭРИ в условиях пониженного давления может возникнуть ситуация, когда выделяемая ЭРИ тепловая энергия приведет к выходу ДЛП из строя. Такая ситуация может потребовать обеспечения дополнительного теплоотвода, поэтому конструкцией датчика, показанной на рис. 1, предусмотрен радиатор 4, который обеспечивает отвод тепла со стабилизатора напряжения 142ЕН12.

Для определения соответствия температурных режимов эксплуатации ЭРИ в ДЛП температурным режимам ЭРИ, допускаемыми техническими условиями на них, проведено имитационное моделирование тепловых режимов работы ДЛП в условиях пониженного давления с помощью программного обеспечения Solidworks и модуля FlowSimulation [7].

Для имитации работы ДЛП была создана 3D-модель ДЛП с приспособлением для задания перемещения, представленная на рис. 1. Имитационное моделирование проводилось исходя из условий эксплуатации датчика и крепления его на объекте. Начальная температура корпуса и элементов ДЛП принята равной 20 °С. Моделирование проводилось при отсутствии естественной конвекции [8], что имитирует работу ДЛП при пониженном давлении.

На рис. 2 представлена тепловая модель ДЛП в условиях пониженного давления $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па за время непрерывной работы 7200 с. Максимальную температуру 99,3 °С имеет микросхема стабилизатора напряжения 142ЕН12, установленная на плате 3в (рис. 1). Техническими условиями допускается работа микросхемы 142ЕН12 при температуре до 125 °С.

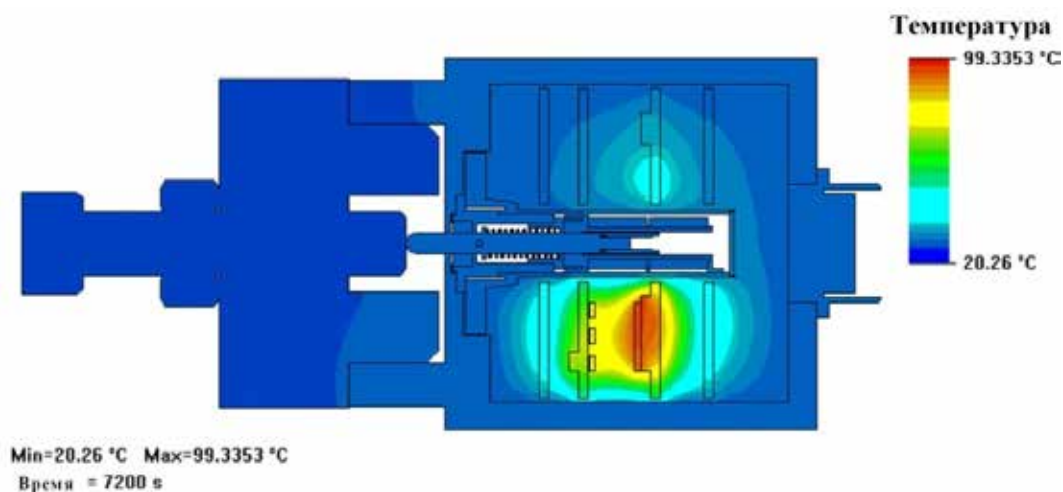


Рис. 2. Распределение температуры внутри ДЛП при воздействии пониженного давления

Тепловые модели плат 3б и 3в (рис. 1) представлены на рис. 3. На плате 3б установлена микросхема 142ЕН5А, которая разогревается максимально до 56 °С, что не приведет к отказу ДЛП и соответственно не требует введения дополнительного теплоотвода, так как предел рабочей температуры микросхемы 142ЕН5А равен 125 °С.

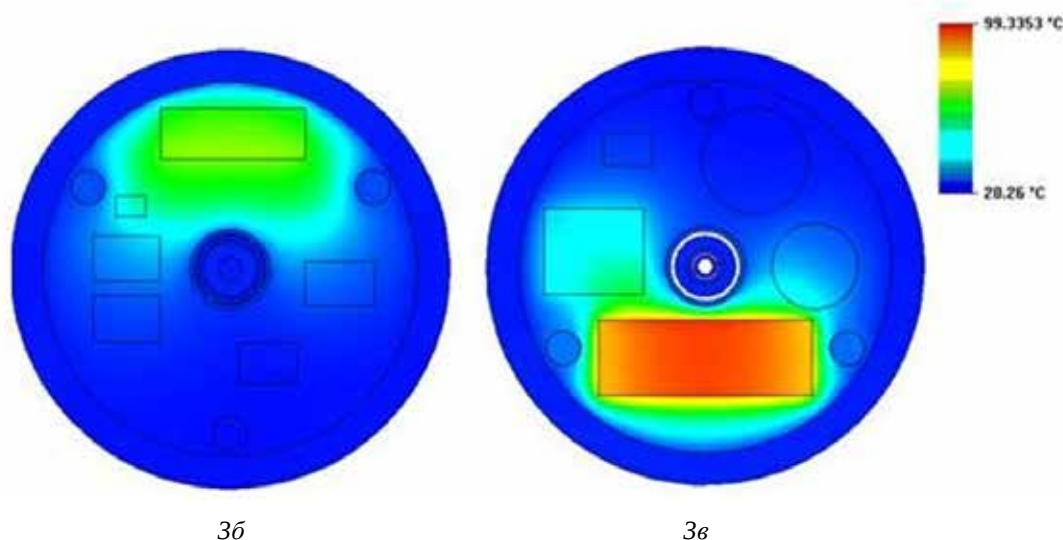


Рис. 3. Тепловая модель плат 3в и 3б ДЛП при работе в условиях пониженного давления

На рис. 4 показано, как разогревалась микросхема 142ЕН12 за 7200 с при работе в условиях пониженного давления. Из рис. 4 следует, что тепловой баланс достигается при значении температуры 99,3 °С между 4600 и 6000 с работы ДЛП.

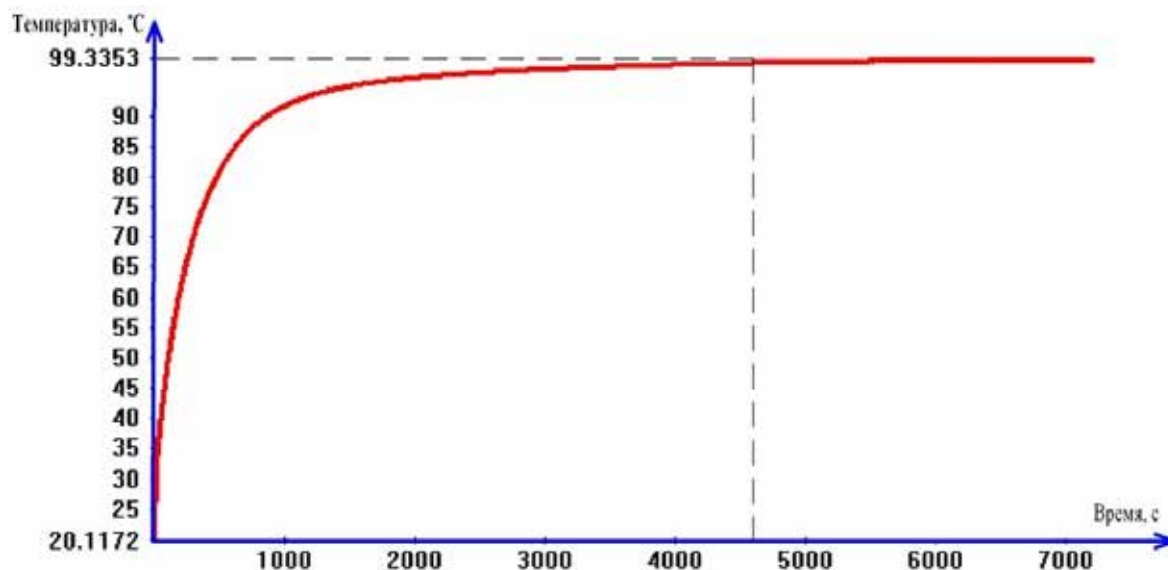


Рис. 4. Изменение максимальной температуры ДЛП при работе в условиях пониженного давления

Для подтверждения правильности полученных результатов имитационного моделирования проведена проверка работоспособности ДЛП в условиях пониженного давления. Оценка проведена экспериментально путем определения дополнительной погрешности ДЛП, которая при пониженном давлении в значительной степени определяется температурой.

При проведении эксперимента ДЛП с приспособлением для задания перемещения был помещен в вакуумную установку УРМ-3 и подключен к приборам согласно схеме, представленной на рис. 5. После набора в камере установки значения пониженного давления $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па

было включено питание датчика. ДЛП во включенном состоянии находился в камере в течение 2 ч, при этом проводился контроль выходного сигнала от перемещения.

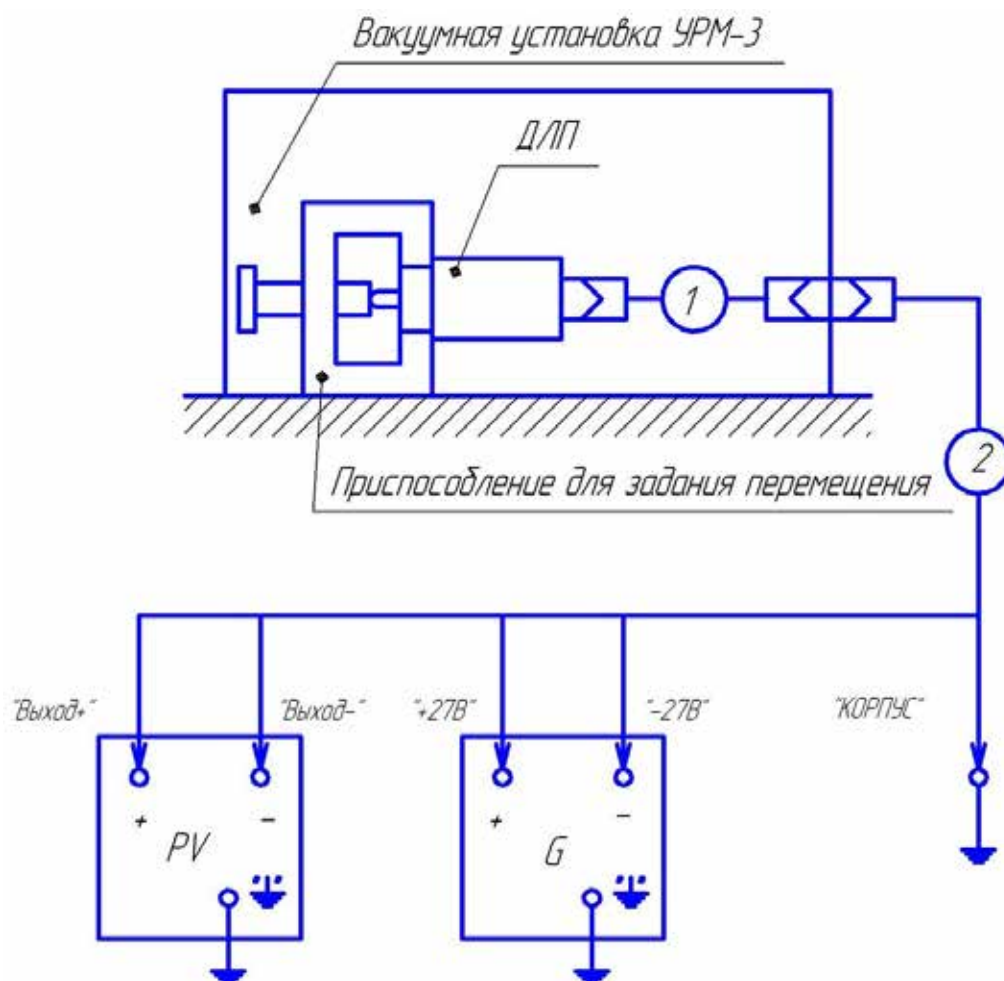


Рис. 5. Схема испытаний ДЛП на воздействие пониженного давления:
1, 2 – кабели для подключения приборов; G – источник питания постоянного тока Б5-8;
PV – вольтметр универсальный В7-34А

Проведено три цикла испытаний по описанной выше методике. Экспериментально полученные значения выходного сигнала с ДЛП представлены в табл. 1.

Таблица 1

Выходной сигнал ДЛП

Значение влияющей величины	Значение измеряемой величины	Номер цикла		
		1	2	3
		Выходной сигнал, В		
Давление, Па (мм рт.ст.)	Перемещение, мм	U_1	U_2	U_3
от $8,6 \cdot 10^4$ до $10,6 \cdot 10^4$	2,5	3	3	3
$1,33 \cdot 10^{-4}$	2,5	2,967	2,968	2,968

Эти данные позволяют рассчитать величину погрешности γ в интервале изменения влияющей величины [9].

Среднее значение выходного сигнала при нормальном давлении определяется как

$$U_{\text{СРНОРМ}} = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{3}. \quad (2)$$

Среднее значение выходного сигнала при пониженном давлении определяется как

$$U_{\text{СРПОНИЖ}} = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{3}. \quad (3)$$

Значение дополнительной погрешности от воздействия пониженного давления определяется выражением

$$\gamma_{\text{ДР}} = \pm \frac{|U_{\text{СРПОНИЖ}} - U_{\text{СРНОРМ}}|}{N} 100 \%, \quad (4)$$

где N – значение нормирующей величины, равное 6 В.

В соответствии с формулами (2)–(4) дополнительная погрешность от воздействия пониженного давления составит $\gamma_{\text{ДР}} = \pm 0,544 \%$.

Заключение

ДЛП по результатам эксперимента выдержал испытание на воздействие пониженного давления, при этом дополнительная погрешность составила $\pm 0,544 \%$ [10], что говорит о его работоспособности в условиях пониженного давления $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па. Полученные экспериментальные данные и результаты моделирования подтверждают правильность выбранных конструктивных решений, обеспечивающих его работоспособность в условиях воздействия пониженного давления.

Таким образом, подтверждена возможность определения работоспособности ДЛП в условиях воздействия пониженного давления моделированием тепловых потоков в зависимости от рассеиваемой мощности тепловыделяющих элементов с применением программного обеспечения Solidworks и модуля FlowSimulation.

Библиографический список

1. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник : пер. с англ. / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005. – 588 с.
2. Фаворский, О. Н. Вопросы теплообмена в космосе / О. Н. Фаворский. – М. : Выс. шк., 1972. – 280 с.
3. Рязанцев, Д. А. Датчик линейных перемещений для систем измерения ракетно-космической техники / Д. А. Рязанцев, А. А. Трофимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 42–48.
4. Хорловиц, П. Искусство схемотехники : пер. с англ. / П. Хорловиц. – М. : МИР, 1998. – 704 с.
5. Технические условия 6КО.347.098 ТУЗ ПО.070.052 на микросхему ОСМ 142ЕН5А. – 38 с.
6. Технические условия 6КО.347.098 11ТУ ПО.070.052 на микросхему ОСМ 142ЕН12. – 43 с.
7. Алямовский, А. А. Инженерные расчеты в SolidWorksSimulation / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
8. Исаченко, В. П. Теплопередача : учеб. для вузов / В. П. Исаченко. – 3-е изд. – М. : Энергия, 1975. – 487 с.
9. Осадчий, Е. П. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Е. П. Осадчий. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.
10. Трофимов, А. А. Методическая погрешность расчета магнитных потоков трансформаторных датчиков перемещений / А. А. Трофимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 4 (6). – С. 9–15.

Трофимов Алексей Анатольевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Trofimov Aleksei Anatol'evich

doctor of technical science, professor,
sub-department of information and measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Рязанцев Дмитрий Андреевич

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: nik2@niifi.ru

Ryazantsev Dmitriy Andreevich

design engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Тимонин Роман Михайлович

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: rmt@niifi.ru

Timonin Roman Mikhailovich

design engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 53.072.8

Трофимов, А. А.

Моделирование воздействия пониженного давления на датчик линейных перемещений /
А. А. Трофимов, Д. А. Рязанцев, Р. М. Тимонин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. –
2017. – № 3 (21). – С. 67–73. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-10.

Д. А. Кудрявцева

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ РАЗМЕРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА КРЕМНИЕВОГО РЕЗОНАНСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ

D. A. Kudryavtseva

RESEARCH OF INFLUENCE OF THE CONSTRUCTIVE SIZES ON CHARACTERISTIC THE SENSITIVE ELEMENT OF A SILICON RESONANT PRESSURE TRANSDUCER

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* К современным измерительным устройствам предъявляются требования по повышению помехоустойчивости и снижению массогабаритных показателей. Повышению помехоустойчивости способствует использование преобразователей с частотным выходным сигналом. Снижению массы и габаритных размеров преобразователя способствует использование МЭМС-технологии для изготовления чувствительного элемента (ЧЭ) в интегральном исполнении. Рассматривается первичный измерительный преобразователь давления в изменение частоты колебаний ЧЭ струнного типа. Объектом исследования является конструкция ЧЭ кремниевого резонансного преобразователя давления. Предметом исследования является зависимость частоты колебаний ЧЭ в виде кремниевой струны от ее геометрических параметров. Цель работы – исследование влияния конструктивных размеров на изменение собственной частоты чувствительного элемента кремниевого резонансного преобразователя давления. *Материалы и методы.* Приведены и обоснованы преимущества изготовления кремниевой струны интегральным способом из монокристаллического кремния. С помощью аналитических расчетов и численных методов построена и проанализирована зависимость резонансной частоты колебаний от геометрических параметров струны. *Результаты.* Проведенные расчеты и анализ результатов показали, что для приведенных в статье соотношений размеров струны численное моделирование на основе метода конечных элементов дает удовлетворительные результаты для собственных частот колебаний однородной балки. Однако для малых размеров поперечного сечения струны наблюдались отклонения от линейного закона, что свидетельствует о необходимости учета особенностей построения конечноэлементной сетки для моделирования струн таких пропорций. *Выводы.* Для вычислений и инженерного анализа конструктива упругого элемента систем с микроминиатюрными струнами рекомендуется использовать топологию сетки конечных элементов в виде параллелепипедов либо балочного типа. При моделировании воздействия динамики струны на полупроводниковую структуру, располагающуюся на поверхности или непосредственно в массиве струны, необходимо тщательно подбирать топологию сетки конечных элементов. В качестве первичной верификации результатов численного моделирования можно использовать совпадения результатов моделирования с результатами расчетов по приведенным в статье аналитическим выражениям.

A b s t r a c t. Background. Modern measuring devices are required for improving the noise immunity and reduce weight and size. To improve noise immunity promotes the use of pre-adjustable frequency output signal. Reduction of the weight and dimensions of the Converter promotes the use of MEMS technology for the fabrication of sensitive element (SE) in the integrated design. Is considered the primary measuring Converter of pressure change in the oscillation frequency f of the string type. The object of research is the design of the sensor silicon resonant pressure transducer. The subject of research is the dependence of the oscillation frequency f in the form of a silicon strings from its geometrical parameters. The work purpose is research of influence of structural dimensions on the change in natural frequency of the sensitive element of a silicon resonant pressure transducer. **Materials and methods.** Given and the advantages of making silicon strings integral way of monocrystalline silicon. Using analytical calculations and numerical methods are constructed and analyzed the dependence of resonance frequency of oscillations on the geometric parameters of the string. **Results.** The calculations and analysis of the results showed that given in article, the ratio of the size of the string numerical simulation based on the finite element method gives satisfactory results for natural frequencies of uniform beams. However, for small cross-sectional dimensions of the strings observed deviations from the linear law, which indicates the necessity of taking into account of the peculiarities of constructing the finite element mesh for modeling strings of such proportions. **Conclusions.** For computing and engineering analysis of structural elements of the elastic element systems with miniature strings consider the topology of the finite element mesh in the form of parallelepipeds or beam type. In modeling the impact dynamics of a string on a semiconductor structure located on the surface or in the array of strings, you must carefully choose the topology of the finite element mesh. As the primary verification of the results of numerical simulation it is possible to use a matching simulation results with the results of calculations cited in the article analytical expressions.

К л ю ч е в ы е с л о в а: резонансный преобразователь давления, кремниевая струна, резонансная частота, МЭМС-технологии.

Key words: Silicon resonant pressure transducer, Silicon with, resonance frequency, MEMS-structure.

Наиболее ответственным составным элементом любого измерительного средства являются первичные измерительные преобразователи (ПИП), предназначенные для измерения электрических величин (деформации, давления, усилия, перемещения и т.д.).

В настоящее время интенсивно развивается направление, связанное с созданием ПИП на основе технологии микроэлектромеханические системы (МЭМС) и микросистемной техники. Принцип работы широкого ряда измерительных МЭМС-устройств основан на механическом резонансе. В таких устройствах индуцируют колебания чувствительного элемента с резонансной частотой, которая определяется свойствами материала и геометрией элемента. Под влиянием измеряемого воздействия изменяется частота резонансных колебаний, что позволяет количественно оценить воздействующий фактор.

Традиционные конструкции резонансных преобразователей давления используют в качестве резонатора металлическую струну, закрепленную в держателях методом сжатия. Следствием такого закрепления является возникновение контактных деформаций, негативно влияющих на стабильность метрологических характеристик резонансного преобразователя давления. Кроме этого, несовершенство технологий изготовления металлических струн приводит к погрешностям формы струны в виде неоднородности сечения по ее длине и, как следствие, снижению добротности резонансного преобразователя давления. Стабильность геометрических размеров формы струны может быть достигнута при изготовлении резонансного преобразователя давления из монокристаллического кремния с использованием МЭМС-технологий [1].

Монокристаллический кремний обладает рядом достоинств по сравнению с традиционно применяемыми материалами (прецизионные сплавы, кварц и др.):

- наличие минимального числа структурных дефектов по сравнению с аморфным или поликристаллическим веществами; монокристаллическая структура позволяет существенно снизить или вообще исключить влияние механических свойств поликристаллических материалов на метрологические характеристики измерительных преобразователей;

- снижение влияния на метрологические характеристики чувствительного элемента (ЧЭ) упругого и неупругого механического последствия и ползучести вследствие уменьшения числа структурных дефектов;

- возможность использования анизотропии свойств (механических, электрических и т.д.) для повышения симметрии колебательных движений; анизотропия (кристаллическая симметрия) механических свойств материала совпадает с симметрией колебательной системы (струны) и обеспечивает более высокую стабильность колебаний и, следовательно, уменьшает влияние паразитных форм колебаний струны на измерительный сигнал;

- возможность применения стандартных технологических методов микроэлектроники для изготовления конструкции преобразователя групповым методом при значительном уменьшении массы и габаритов [2].

Кремниевая струна рассматривается как упругая балка (рис. 1), параллелепипед, два размера которого существенно меньше третьего, т.е. $l \leq h, b$ (в исследуемом случае $l = 5000$ мкм, $h \leq 20$ мкм, $b \leq 120$ мкм). Это позволяет достаточно точно аналитически описывать динамику ЧЭ резонансного преобразователя давления на основе теории механических колебаний.

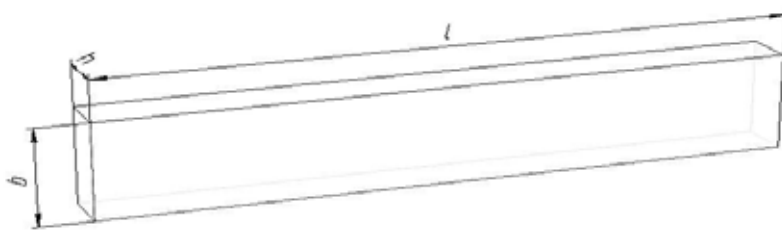


Рис. 1. Геометрия монокристаллической кремниевой струны: l – длина, h – толщина, b – ширина

Гармонические поперечные колебания балки с учетом наличия постоянной удельной растягивающей силы N описываются уравнением

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} (Nu) + \omega^2 \rho S u = 0, \quad (1)$$

где u – перпендикулярное перемещение относительно средней (нейтральной) плоскости балки вдоль толщины или ширины; ρ – объемная плотность; $S = h \cdot b$ – площадь поперечного сечения; ω – собственная частота гармонического колебания; E – модуль Юнга; J – момент инерции поперечного сечения (для выбранной геометрии $J = hb^3/12$ для оси в плоскости толщины и $J = bh^3/12$ для оси в плоскости ширины).

Так как величины E , J и N в рассматриваемом случае являются постоянными, то уравнение (1) можно привести к виду

$$\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \frac{N}{EJ} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \omega^2 \frac{\rho S}{EJ} u = 0.$$

Если положить $N = 0$, уравнение приведет к классическому виду для прогиба гармонически колеблющейся балки с частотой ω , пропорциональной выражению

$$\omega \sqrt{\frac{EJ}{\rho S}}.$$

Из соотношения видно, что если a – характерный размер поперечного сечения упругого элемента, так что $S \sim a^2$ и $J \sim a^4$, то при уменьшении сечения струны частота будет изменяться линейно с характерным размером, т.е. $\omega \sim \sqrt{S} \sim a$.

Такая же линейная зависимость будет наблюдаться, если уменьшать площадь поперечного сечения только лишь за счет одного из размеров h или b . Частота, соответствующая фиксированному размеру, должна оставаться неизменной [3–5].

При условии $N \neq 0$ выражение для частоты существенно усложняется. Но в случае $J \rightarrow 0$, который выполняется, если площадь поперечного сечения также устремить к нулю ($S \rightarrow 0$), второе слагаемое со второй производной в (1) начнет существенно превышать первое слагаемое с четвертой производной, поэтому частота в этом пределе будет стремиться к выражению

$$\omega \sim \sqrt{\frac{N}{\rho S}} \sim \sqrt{\frac{T}{\rho}}.$$

Здесь учтено, что $N/S = T$ является напряжением в поперечном сечении струны, т.е. является натяжением струны, которое и используют при описании классической математической струны. При уменьшении поперечного сечения струны, описываемой упругим элементом в виде балки, при отсутствии растягивающего усилия (натяжения) частота должна изменяться линейно с характерным размером данного сечения $\omega \sim a$, либо не превышать значения по этой зависимости [6–8].

В качестве программной среды для численного моделирования методом конечных элементов была выбрана система CAESolidWorks как наиболее распространенная среди начинающих разработчиков и исследователей. Данная система имеет наиболее характерные для методик численных расчетов недостатки и недочеты, которые в меньшей степени присутствуют в более тяжелых CAE типа ANSYS или ABAQUS благодаря наличию в последних встроенных полуэмпирических правил по оптимизации топологии сетки или расчетных методик. С помощью метода конечных элементов проведено численное моделирование в CAESolidWorks зависимости частоты колебаний от геометрических параметров струны.

На рис. 2, 3 представлены графики нормированных на максимальную аналитическую частоту зависимостей частот колебаний в плоскостях ширины и толщины соответственно от ширины струны.

Результаты расчетов:

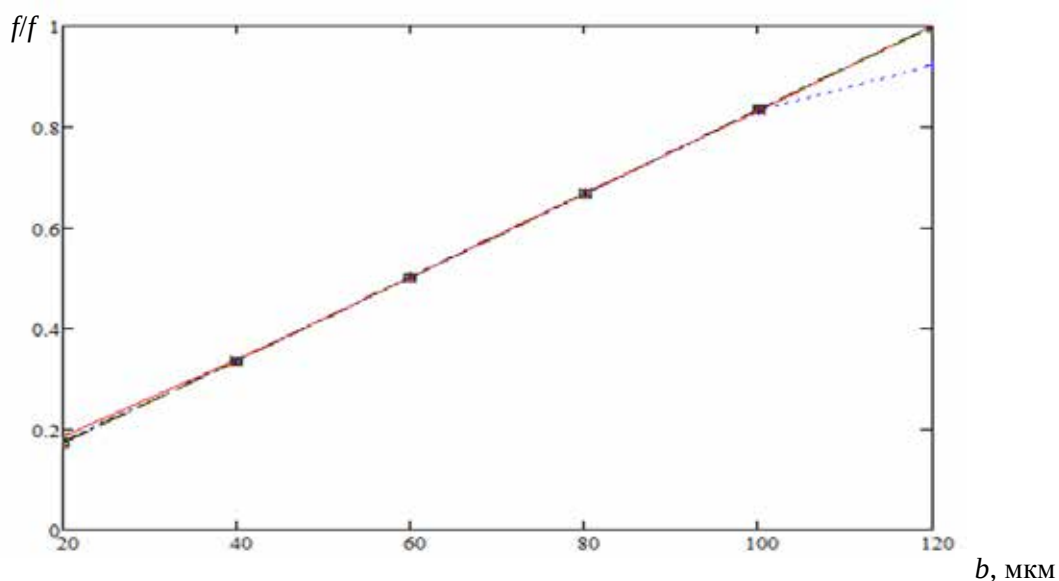


Рис. 2. Зависимость нормированной частоты колебания струны (в плоскости толщины h) от b для разных толщин h

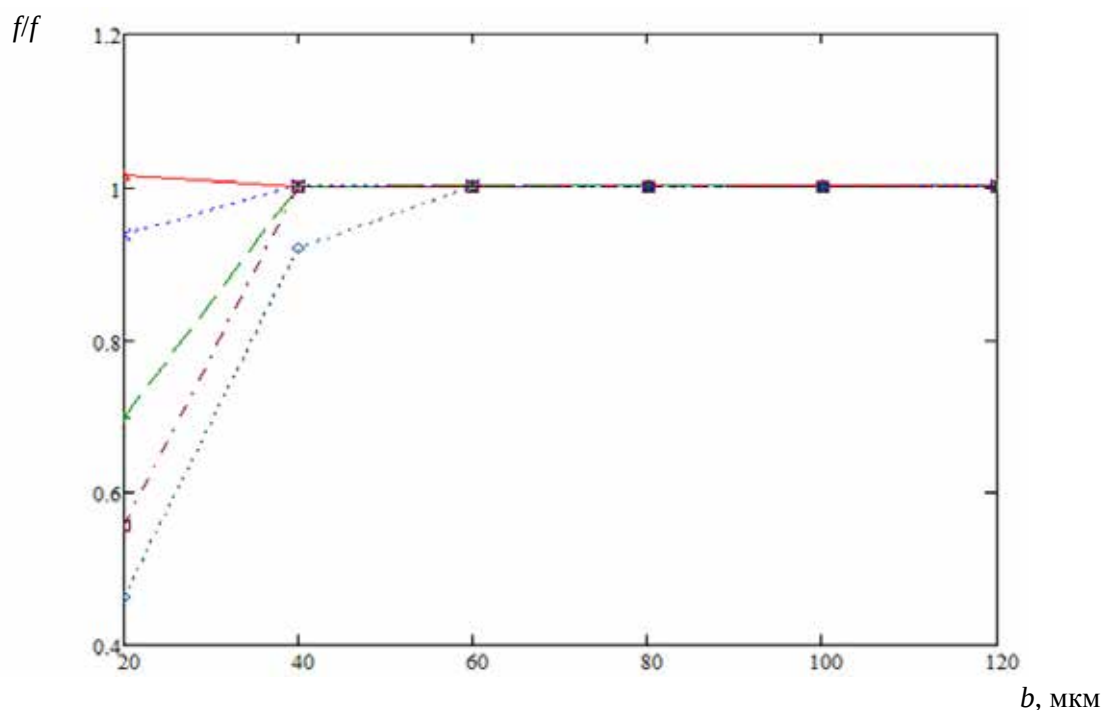


Рис. 3. Зависимость нормированной частоты колебания струны (в плоскости толщины b) от b для разных толщин h

На рис. 4, 5 представлены графики зависимостей относительных (с сохранением знака) погрешностей частот колебаний в плоскостях ширины и толщины от ширины струны.

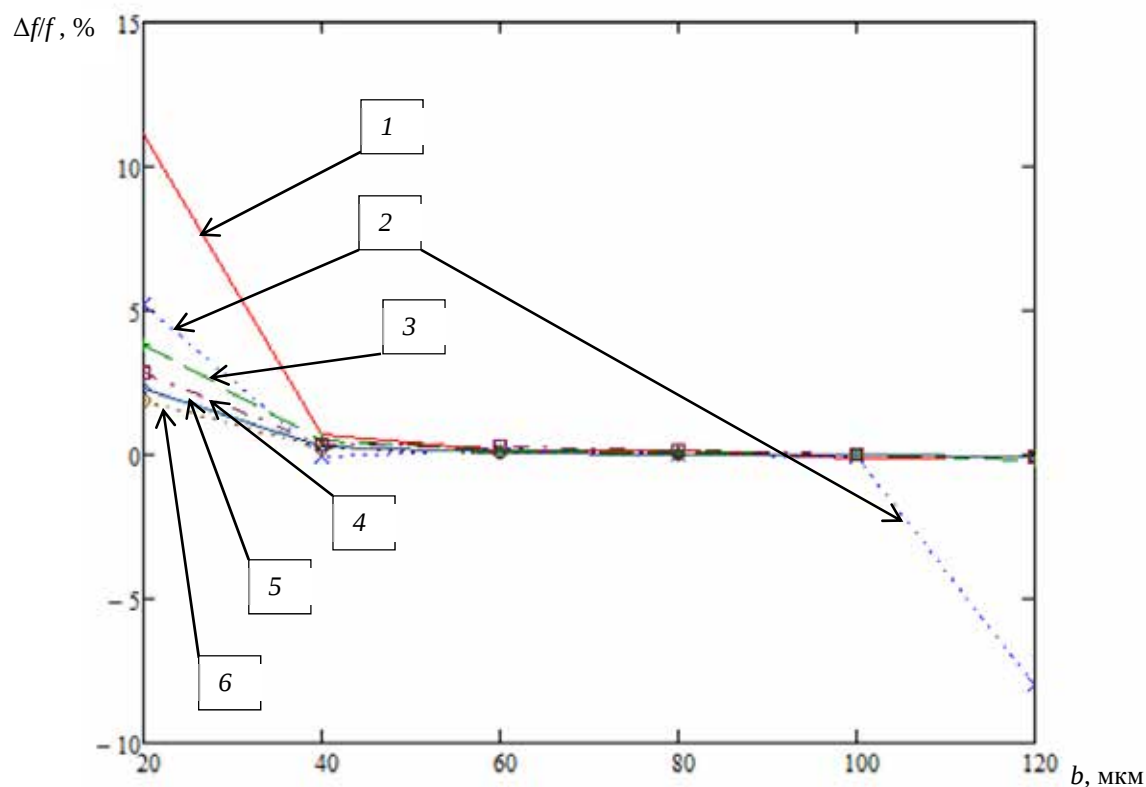


Рис. 4. Зависимость относительных (с сохранением знака) погрешностей частоты колебания струны (в плоскости ширины b) от b для разных толщин h :
1 – квадрат; 2 – 40 мкм; 3 – 60 мкм; 4 – 80 мкм; 5 – 100 мкм; 6 – 120 мкм

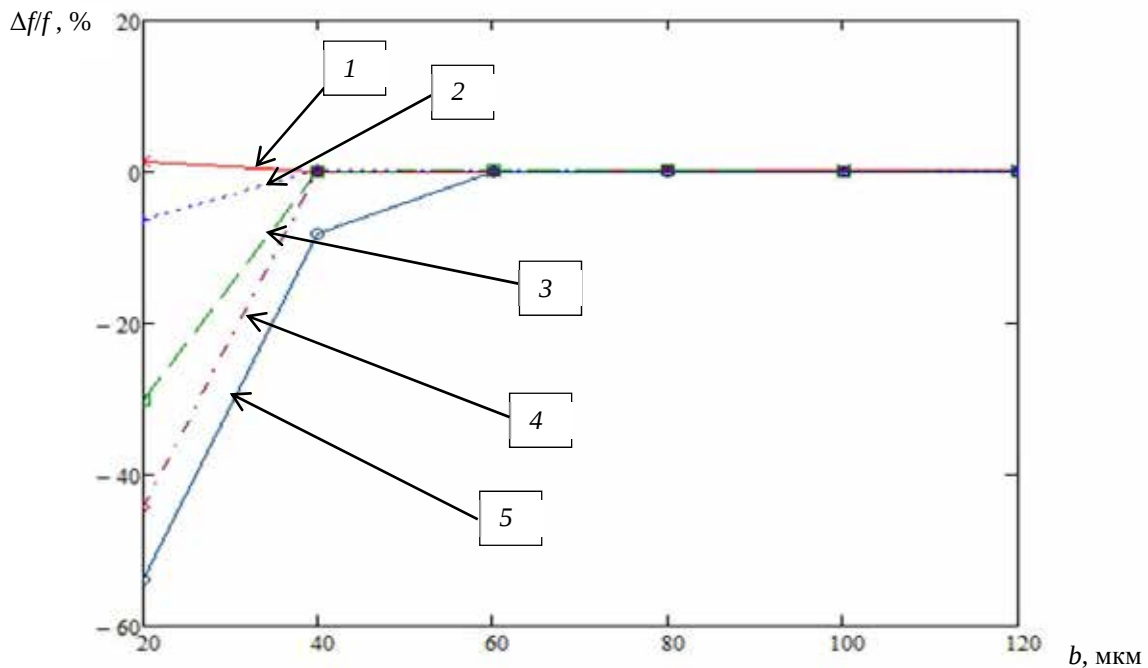


Рис. 5. Зависимость относительных (с сохранением знака) погрешностей частоты колебания струны (в плоскости толщины h) от b для разных толщин h :
1 – 40 мкм; 2 – 60 мкм; 3 – 80 мкм; 4 – 100 мкм; 5 – 120 мкм

В результате проведенных исследований выявлены следующие закономерности:

1) для струны квадратного сечения с размером $b = h = 20$ мкм присутствует небольшое отклонение в сторону завышения частоты по сравнению с аналитическим расчетом того же размера;

2) для струн с прямоугольным поперечным сечением имеется аналогичное отклонение частоты колебаний в плоскости ширины b при минимальной ширине $b = 20$ мкм, при этом оно постепенно уменьшается с ростом толщины h струны;

3) для струны с прямоугольным поперечным сечением толщины $b = 40$ мкм имеется также существенная расхожимость, и при максимальной ширине $b = 120$ мкм;

4) у всех типов прямоугольных сечений струны при ширине $b = 20$ мкм для колебаний в плоскости толщины h имеется значительное расхождение, причем оно растет с увеличением h , а при $h = 120$ мкм появляется значительное расхождение с аналитическим значением частоты и для $b = 40$ мкм.

Как было показано в начале статьи, при уменьшении поперечного сечения кремниевая струна, представляющая собой балку, при наличии растягивающего усилия начинает все больше и больше соответствовать классической теории математической струны с бесконечно малым поперечным сечением, у которой колебания определяются только силами натяжения [9]. Поэтому адекватная приближенная (численная) математическая модель при отсутствии исходного натяжения струны не должна давать значения частоты, существенно отличающиеся от линейного закона, полученного на основании аналитического выражения для частоты однородной балки.

Так как изучаемая модель (рис. 1) имеет простейшую геометрическую форму и не имеет конструктивных особенностей вроде концентраторов напряжения или многосвязных областей, то топологическая структура конечной элементной сетки должна быть достаточно однородной. Поэтому ожидалось, что именно струна с квадратным сечением будет давать наилучшее приближение при уменьшении поперечного сечения [10]. Проведенные исследования квадратного и прямоугольного сечения струны позволяют говорить о том, что конечноэлементная модель, построенная с помощью CAESolidWorks, характеризуется отклонением от линейной зависимости для малых поперечных сечений. Результаты численного моделирования превышают аналитически рассчитанные значения. Судя по тому, что относительная погрешность

для минимальной ширины струны при увеличении ее толщины постепенно уменьшается (см. рис. 4), основная причина такого несоответствия кроется в ограниченной плотности конечных элементов в сечении модели струны. Всплеск относительной погрешности для максимальной ширины одной из струн прямоугольного сечения (рис. 4, ломаная 2) является случайностью построения конечно-элементной сетки с плохо обусловленной матрицей, что еще раз подтверждает важность топологии структуры конечных элементов у численной модели струны. У всех типов прямоугольных сечений струны при ширине $b = 20$ мкм для колебаний в плоскости толщины h имеется значительное расхождение, причем оно растет с увеличением h , а при $h = 120$ мкм появляется значительное расхождение с аналитическим значением частоты и для $b = 40$ мкм, что также является следствием зависимости точности расчета от топологии конечных элементов. Объяснение указанных особенностей поведения расчетов кроется в том, что система CAESolidWorks строила топологию сетки с элементом случайности распределения узлов. Увеличение плотности сетки позволяло повысить точность решения, но иногда приводило к частично или полностью неудовлетворительным результатам.

И, наконец, в арсенале программного обеспечения средств САЕ есть различные виды специальных конечных элементов, в частности, в виде балочной функции. Их применение показало полное соответствие результата расчета аналитической теории, при этом существенно сократив время на проведение расчета.

Моделирование струны с помощью других, более тяжелых САЕ (ANSYS и ABAQUS), где для данной геометрии система выбрала в качестве решетки наиболее близкую геометрию в виде прямоугольных параллелепипедов, позволило получить результаты, которые по точности почти не уступали значениям из аналитического решения или конечных элементов в виде балки. Однако такой подход к решению будет существенно осложнен при необходимости моделирования какой-либо топологии на поверхности струны или в ее структуре, а также при разработке струны более сложной формы, чем представленная на рис. 1.

Проведенные расчеты и анализ результатов показали, что для выбранных соотношений размеров струны численное моделирование на основе метода конечных элементов дает удовлетворительные результаты для собственных частот однородной балки. Однако для малых размеров поперечного сечения струны наблюдались отклонения от линейного закона. Причем тот факт, что данная погрешность уменьшалась при увеличении отношения толщины к ширине, в то время как в перпендикулярной плоскости наблюдалось увеличение относительной погрешности собственной частоты, говорит о том, что имеет место существенное влияние топологии конечных элементов численной модели струны.

Наличие одного значительного выброса погрешности вычисления не критично, но лишний раз указывает на то, что при расчетах для сравнения надо проводить серию вычислительных экспериментов с разными топологиями сеток, как минимум – два.

Для вычислений и инженерного анализа конструктива упругого элемента систем с микроминиатюрными струнами рекомендуется использовать топологию с конечными элементами в виде параллелепипедов либо балочного типа. При необходимости моделирования воздействия динамики струны на топологию, располагающуюся на поверхности или непосредственно в ее массиве, необходимо будет тщательно подбирать топологию конечных элементов. В качестве первичной верификации результатов численного моделирования можно использовать совпадения результатов моделирования с результатами расчетов по приведенным в статье аналитическим выражениям.

Библиографический список

1. Кучумов, Е. В. Струнный автогенераторный измерительный преобразователь на основе пьезоструктуры / Е. В. Кучумов, И. Н. Баринков, В. С. Волков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 2 (8). – С. 58–65.
2. Кудрявцева, Д. А. Исследование влияния температуры на выходной сигнал кремниевых резонансных преобразователей давления / Д. А. Кудрявцева, Б. В. Цыпин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 3 (17). – С. 42–51.
3. Милохин, Н. Т. Частотные датчики систем автоконтроля и управления / Н. Т. Милохин // Библиотека по автоматике. – 2013. – № 310. – С. 131–138.

4. Карцев, Е. А. Датчики неэлектрических величин на основе унифицированного микро-механического резонатора / Е. А. Карцев // Приборы и системы управления. – 1966. – № 4. – С. 136–141.
5. Тимошенко, С. П. Сопротивления материалов / С. П. Тимошенко. – М. : Наука, 1979. – 135 с.
6. Баринов, И. Н. Оптимизация параметров полупроводниковых чувствительных элементов датчиков абсолютного давления / И. Н. Баринов // Приборы. – 2009. – № 4. – С. 47–51.
7. Волков, В. С. Компенсация температурной погрешности чувствительности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 1 (3). – С. 30–36.
8. Баринов, И. Н. Высокотемпературные чувствительные элементы датчиков давления со структурой «кремний на диэлектрике» / И. Н. Баринов // Датчики и системы. – 2007. – № 1. – С. 36–39.
9. Эткин, Л. Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика / Л. Г. Эткин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 408 с.
10. Новицкий, П. В. Цифровые приборы с частотными датчиками / П. В. Новицкий, В. Г. Кнорринг, В. С. Гутников. – Л. : Энергия, 1970. – 424 с.

Кудрявцева Дарья Александровна

аспирант,

Научно-исследовательский институт

физических измерений

(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)

E-mail: dashuliy2308@yandex.ru

Kudryavtseva Dar'ya Aleksandrovna

postgraduate student,

Scientific-research Institute

of physical measurements

(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 51-74:621, 681.5

Кудрявцева, Д. А.

Исследование влияния конструктивных размеров на характеристики чувствительного элемента кремниевого резонансного преобразователя давления / Д. А. Кудрявцева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 74–81. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-11.

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

УДК 621.3.014.14:621.3.088

DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-12

С. В. Абрамов

ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХЧАСТОТНОГО МЕТОДА ВЫДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОГО СИГНАЛА ПРИ ПОСТРОЕНИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРВИЧНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

S. V. Abramov

THE USE OF DUAL-FREQUENCY ALLOCATION METHOD IN THE CONSTRUCTION OF INFORMATIVE SIGNAL MEASURING CIRCUITS OF THE PRIMARY EDDY CURRENT PROBES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. При измерении перемещений, биений валов актуальной проблемой является раздельное измерение информативных и неинформативных параметров первичных вихретоковых преобразователей (ПВП) и в дальнейшем компенсация различными схемотехническими способами неинформативных. Целью работы является сравнительная оценка двухчастотного метода с одинаковыми и различными начальными фазами, рассмотрение влияния некомпенсации на приведенную погрешность. **Материалы и методы.** Для решения поставленной задачи рассматривались функциональные зависимости ПВП на основной и вспомогательной частоте. **Результаты.** С учетом условий полной компенсации неинформативного параметра рассмотрено влияние некомпенсации по амплитуде и фазе на выходной сигнал ПВП. Выявлены преимущества и недостатки двухчастотного метода с одинаковыми и разными начальными фазами. **Выводы.** Двухчастотный метод может быть использован при решении вопроса подавления неинформативных параметров ПВП.

A b s t r a c t. Background. When measuring displacement, the beating shaft pressing problem is the separate measurement of informative and uninformative parameters of the primary probes (PVP) and further compensation circuit various ways uninformative. The aim of this work is to consider a dual-frequency method for the same and different initial phases, getting a full refund uninformative parameter, considering the impact of decompensaciei the following error. **Materials and methods.** To solve this task we considered the functional dependence of the VFR on the main and auxiliary frequency. **Results.** The condition of full payment uninformative parameter, the influence of decompensaciei amplitude and phase on the output of PVP. Advantages and disadvantages of dual-frequency method with same and different initial phases. **Conclusions.** Dual-frequency method can be used when addressing the issue of suppressing uninformative parameters of the UIP.

К л ю ч е в ы е с л о в а: схема замещения, двухчастотный метод, начальная фаза, ток некомпенсации, первичный вихретоковый преобразователь, информативный сигнал, приведенная погрешность.

Key words: Equivalent circuit, dual-frequency method, the initial phase, the current non-compensation, the primary eddy current transducer, data signal, reduced error.

Важной проблемой при измерении перемещений, биений валов является разделение информации о воздействующих параметрах [1–8]. В этом плане преимуществами обладают методы, в которых из выходного сигнала первичного вихретокового преобразователя (ПВП) можно так сформировать информационный сигнал, чтобы из всей совокупности воздействующих факторов сохранилось влияние лишь одного параметра, подлежащего контролю, а воздействие остальных, рассматриваемых как мешающие, сводится к минимуму. Для решения этой проблемы, помимо амплитудно-фазового, можно применить двухчастотный метод.

Целью работы является сравнительная оценка двухчастотного метода с одинаковыми и различными начальными фазами с учетом условий полного подавления неинформативной составляющей выходного сигнала оценка влияния неполной компенсации на приведенную погрешность.

В работе [9] приводится эквивалентная схема замещения ПВП, которая содержит элементы, параметры которых не зависят от входной измеряемой величины и при преобразовании вторичным электронным преобразователем должны быть скомпенсированы, и элементы, параметры которых зависят от перемещения и должны быть преобразованы в выходной ток.

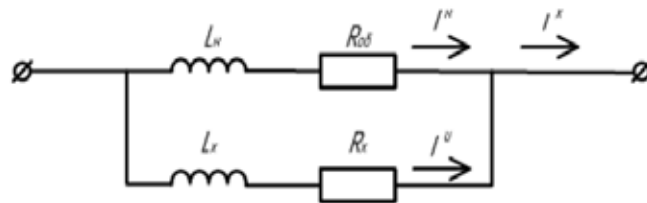


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения ПВП

При протекании переменного электрического синусоидального тока I^x через измерительную катушку основной магнитный поток, создаваемый этим электрическим током, будет наводить во всех электропроводящих объектах вихревые токи. При протекании этих токов во всех электропроводящих объектах создается магнитный поток, встречный основному магнитному потоку и уменьшающий его. Так как электропроводность материала и ее зависимость от температуры объектов, которые пронизывают магнитный поток, различны, то для уменьшения температурной погрешности вихретоковых преобразователей необходимо устранить с пути протекания магнитного потока все электропроводящие объекты, кроме объекта контроля, перемещение которого измеряется, что обеспечивается соответствующим пространственным расположением. При перемещении электропроводящего объекта контроля относительно измерительной катушки в зависимости от расстояния между ними изменяется величина магнитного потока, пронизывающего электропроводящий объект контроля, и изменяется величина суммарных вихревых токов в объекте контроля.

При двухчастотном методе используется отклик объекта контроля не только на основной, но и на дополнительной частоте [10]. Сигнал на основной и вспомогательной частоте может иметь одинаковые или различные начальные фазы [11].

При одинаковых фазах сигнала на основной и вспомогательной частоте информативный сигнал I может быть записан в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 I_{\Sigma}(t) &= I \exp[j(\omega_{\Pi}t + \varphi_1)] + I_2 \exp[j(\omega_{\Pi}t + \varphi_2)] = \\
 &= \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1I_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)} \exp \left[j \left(\omega_{\Pi}t + \arctg \frac{I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2}{I \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2} \right) \right], \quad (1)
 \end{aligned}$$

где I_1 и I_2 , φ_1 и φ_2 – амплитуды и фазы составляющих; ω_{Π} – промежуточная частота преобразования.

На комплексной плоскости (рис. 2) информационный сигнал (1) представлен вектором I_{Σ_0} как сумма векторов I_{10} и I_{20} , полученных после преобразования сигналов обеих частот. При изменении перемещения измеряются векторы ΔI_1 и ΔI_2 , а также информационный сигнал вектор ΔI_{Σ} . Поскольку $\Delta I_{\Sigma} = \Delta I_1 + \Delta I_2$, приращение информационного сигнала может быть выражено через векторы I_1 , I_{10} , I_2 , I_{20} следующим образом:

$$\begin{aligned}\Delta I_{\Sigma} &= (I_1 - I_{10}) + (I_2 - I_{20}) = [I_1 \exp[j(\omega_{\Pi}t + \varphi_{10} + \Delta\varphi_1)] - \\ &- I_{10} \times \exp[j(\omega_{\Pi}t + \varphi_{10})]] + [I_2 \exp[j(\omega_{\Pi}t + \varphi_{20} + \Delta\varphi_2)] - \\ &- I_{20} \exp[j(\omega_{\Pi}t + \varphi_{20})]] = I_1 \exp[j(\omega_{\Pi}t + \varphi_{10})] + I_1 \exp[j(\Delta\varphi_{10})] - \\ &- I_2 \exp[j(\omega_{\Pi}t + \varphi_{20})] + I_2 \exp[j(\Delta\varphi_{20})] = ((q_1 \exp(j(\Delta\varphi_1)) - \\ &- \exp(j\Delta\varphi_{10})) - (q_2 \exp(j(\Delta\varphi_2)) - \exp(j\Delta\varphi_{20})) \cdot m) \exp(j(\varphi_{20} - \varphi_{10})); \\ \Delta I_{\Sigma_0} &= I_{10} + I_{20} = I_{10} \exp(j(\omega_{\Pi}t + \varphi_{10})) + I_{20} \exp(j(\omega_{\Pi}t + \varphi_{20})),\end{aligned}$$

где $q_1 = \frac{I_1}{I_{10}}$; $q_2 = \frac{I_2}{I_{20}}$; $m = \frac{I_{20}}{I_{10}}$.

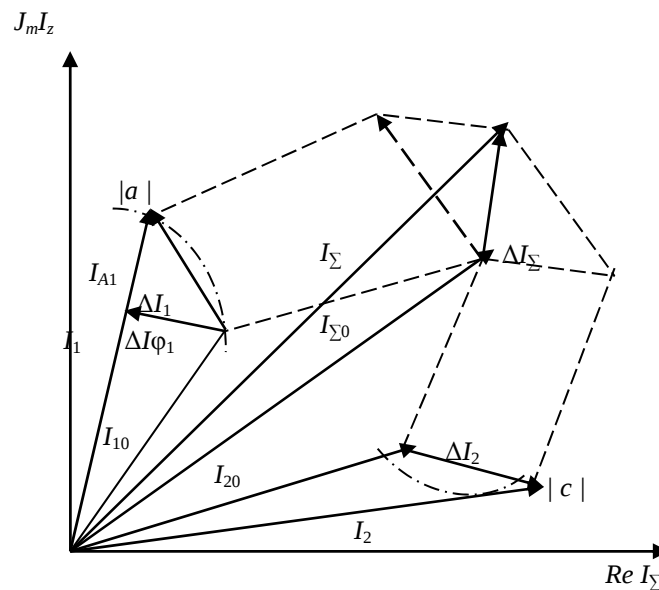


Рис. 2. Графическое представление двухчастотного метода выделения полезного сигнала на одной частоте на разных начальных фазах

Приведенная погрешность для данного случая примет вид

$$\gamma = \frac{\Delta I_{\Sigma}}{\Delta I_{\Sigma} + I_{\Sigma_0}},$$

то есть

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{(q_1 \exp(j(\Delta\varphi_1)) - \exp(j\Delta\varphi_{10})) - (q_2 \exp(j(\Delta\varphi_2)) - \exp(j\Delta\varphi_{20}))}{((q_1 \exp(j(\Delta\varphi_1)) - \exp(j\Delta\varphi_{10})) - (q_2 \exp(j(\Delta\varphi_2)) - \exp(j\Delta\varphi_{20})))} \times \\ &\times \frac{m \exp(j(\varphi_{20} - \varphi_{10}))}{m \exp(j(\varphi_{20} - \varphi_{10})) + (1 + m \exp[j(\varphi_{20} - \varphi_{10})])} =\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1 + m \frac{q_2 \exp(j\Delta\varphi_2) - 1}{q_1 \exp(j\Delta\varphi_1) - 1} \cdot (j(\varphi_{20} - \varphi_{10})(q_1 \exp(j\Delta\varphi_1) - 1))}{1 + m \frac{q_2 \exp(j\Delta\varphi_2) - 1}{q_1 \exp(j\Delta\varphi_1) - 1} (j(\varphi_{20} - \varphi_{10})((q_1 \exp(j\Delta\varphi_1) - 1) + (1 + m \exp[j(\varphi_{20} - \varphi_{10})]))} = \\
&= 1 + \frac{1 + m \frac{q_2 \exp(j\Delta\varphi_2) - 1}{q_1 \exp(j\Delta\varphi_1) - 1} j(\varphi_{20} - \varphi_{10})(q_1 \exp(j\Delta\varphi_1) - 1)}{(1 + m \exp[j(\varphi_{20} - \varphi_{10})])} = 1 + m \frac{\sqrt{q_2^2 - 2q_2 \cos \Delta\varphi_2 + 1}}{\sqrt{q_1^2 - 2q_1 \cos \Delta\varphi_1 + 1}} \times \\
&\quad \times \frac{\exp\left(\varphi_{20} - \varphi_{10} + \operatorname{arctg} \frac{q_2 \sin \Delta\varphi_2}{q_2 \sin \Delta\varphi_2 - 1} - \operatorname{arctg} \frac{q_1 \sin \Delta\varphi_2}{q_1 \sin \Delta\varphi_2 - 1}\right)}{\sqrt{1 + m^2 + 2m \cos(\varphi_{20} - \varphi_{10})} \exp\left(j \operatorname{arctg} \frac{m \sin(\varphi_{20} - \varphi_{10})}{1 + m \cos(\varphi_{20} - \varphi_{10})}\right)}. \quad (2)
\end{aligned}$$

Из (2) следует, что полное подавление начального неинформативного параметра будет выполняться при

$$m \frac{\sqrt{q_2^2 - 2q_2 \cos \Delta\varphi_2 + 1}}{\sqrt{q_1^2 - 2q_1 \cos \Delta\varphi_1 + 1}} \exp\left(\varphi_{20} - \varphi_{10} + \operatorname{arctg} \frac{q_2 \sin \Delta\varphi_2}{q_2 \sin \Delta\varphi_2 - 1} - \operatorname{arctg} \frac{q_1 \sin \Delta\varphi_2}{q_1 \sin \Delta\varphi_2 - 1}\right) = 0. \quad (3)$$

Выражение (3) показывает, что полное подавление неинформативного параметра возможно в том случае, когда величины $I_{10}\sqrt{q_2^2 - 2q_2 \cos \Delta\varphi_2 + 1}$, $I_{20}\sqrt{q_1^2 - 2q_1 \cos \Delta\varphi_1 + 1}$ равны по модулю, но противоположны по знаку.

Проведем оценку влияния некомпенсации по фазе и амплитуде для выражения (2).

Примем следующие значения: $I_{10} = k_1 I_{20}$, $\Delta\varphi_2 = k_2 \Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2 = 50^\circ$, $\Delta\varphi_1 = 50^\circ$, а коэффициентам, исходя из полученных соотношений в ходе эксперимента, присвоим значения $q_1 = 1,5$, $q_2 = 1,5$.

Коэффициенты k_1 и k_2 принимают значения от 1,02 до 1,20 с шагом 0,02 (табл. 1), что наглядно представлено на рис. 3.

Таблица 1

Результаты изменения приведенной погрешности в зависимости от некомпенсации по амплитуде (k_1) и по фазе (k_2) для двухчастотного метода на различных начальных фазах

$\gamma, \%$	k_1										
	1,0	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,2
k_2	1,02	7,04	8,16	9,27	10,36	11,44	12,50	13,55	14,59	15,61	16,62
	1,04	11,06	12,21	13,35	14,47	15,58	16,67	17,75	18,82	19,87	20,90
	1,06	15,14	16,32	17,49	18,65	19,79	20,91	22,02	23,11	24,19	25,25
	1,08	19,19	20,51	21,71	22,90	24,07	25,22	26,36	27,48	28,58	29,67
	1,1	23,50	24,76	25,99	27,21	28,41	29,59	30,76	31,91	33,04	34,16
	1,12	27,79	29,07	30,34	31,59	32,89	34,04	35,23	36,41	37,57	38,71
	1,14	32,14	33,46	34,76	36,04	37,30	38,35	39,77	40,98	42,16	43,32
	1,16	36,56	37,91	39,24	40,55	41,85	43,12	44,37	45,61	46,82	48,02
	1,18	41,04	42,43	43,79	45,13	46,46	47,76	49,04	50,31	51,55	52,77
	1,20	45,59	47,01	48,40	49,78	51,13	52,46	53,78	55,07	56,35	57,67

По материалам табл. 1 можно сделать вывод, что при некомпенсации по амплитуде на 20 % приведенная погрешность будет составлять 45,59 %, при некомпенсации по фазе на 20 % приведенная погрешность будет составлять 16,62 %, при совместной некомпенсации по фазе и амплитуде приведенная погрешность будет составлять 57,67 %.

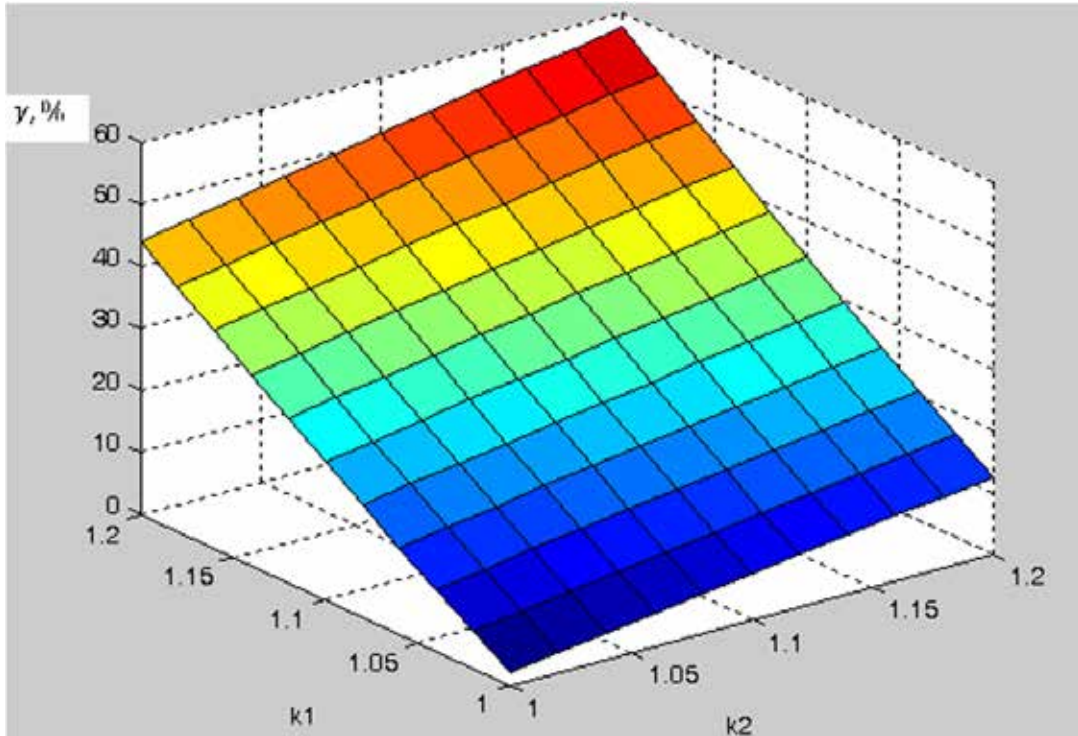


Рис. 3. График изменения приведенной погрешности в зависимости от некомпенсации по амплитуде (k_1) и по фазе (k_2) для двухчастотного метода на разных начальных фазах

Во втором случае фазы сигналов на основной и вспомогательной частоте одинаковы. Выходной сигнал для данного способа имеет вид

$$I_{\Sigma, \varphi}(t) = I_1 \exp[j(\omega_{\Pi} t + \varphi_{\Pi})] + I_2 \exp[j(\omega_{\Pi} t + \varphi_{\Pi})] = (I_1 + I_2) \exp[j(\omega_{\Pi} t + \varphi_{\Pi})], \quad (4)$$

где ω_{Π} , φ_{Π} – соответственно частота и фаза преобразования.

На комплексной плоскости (рис. 4) этот сигнал представлен вектором I_{Σ, φ_0} как сумма векторов I_{10} и I_{20} ; $I_{\Sigma, \varphi}$ – как сумма векторов I_1 и I_2 .

Сигнал (4), в отличие от (1), обладает зависимостью амплитуды и фазы от соответствующих информативных параметров исходных напряжений. Важно отметить, что в (4) отсутствует зависимость амплитуды информационного сигнала от фаз суммируемых напряжений, а фаза в (4) не зависит от амплитуд напряжений I_1 и I_2 . В результате возникает возможность раздельной оценки функций влияния неинформативного параметра информационного сигнала. Изменение последнего запишем как разность конечного $I_{\Sigma, \varphi}$ и начального I_{Σ, φ_0} векторов:

$$\begin{aligned} \Delta I_{\Sigma, \varphi} &= (I_1 + I_2) \exp[j(\varphi_{10} + \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2)] - (I_{10} + I_{20}) \exp[j(\varphi_{10})] = \\ &= \left[\frac{I_1 + I_2}{I_{10} + I_{20}} \exp[j(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2)] - 1 \right] \times (I_{10} + I_{20}) \exp[j(\varphi_{10})] = \\ &= \left[\frac{q_1 + mq_2}{1+m} \exp[j(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2)] - 1 \right] \times (1+m) U_{10} \exp[j(\varphi_{10})], \end{aligned} \quad (5)$$

где I_{10} , I_{20} , φ_{10} – начальные значения информативных параметров (рис. 3); I_1 , I_2 , $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$ – амплитуды и приращения фаз;

$$\Delta I_{\Sigma, \varphi_0} = (1+m) I_{10} \exp[j(\varphi_{10})].$$

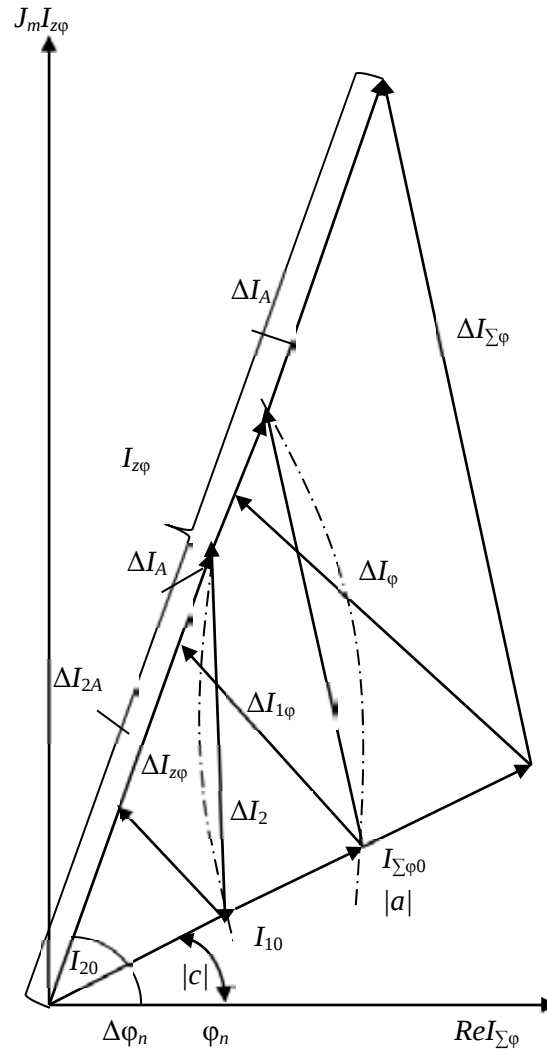


Рис. 4. Графическое представление двухчастотного метода выделения полезного сигнала на одной частоте на одинаковых начальных фазах

Приведенная погрешность для этого случая принимает вид

$$\gamma = \frac{\Delta I_{\Sigma}}{\Delta I_{\Sigma} + I_{\Sigma_0}};$$

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\left[\frac{q_1 + mq_2}{1+m} \exp[j(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2)] - 1 \right] \times (1+m) I_{10} \exp[j(\varphi_{10})]}{\left[\frac{q_1 + mq_2}{1+m} \exp[j(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2)] - 1 \right] \times (1+m) I_{10} \exp[j(\varphi_{10})] + (1+m) I_{10} \exp[j(\varphi_{10})]} = \\ &= \frac{q_1 + mq_2}{1+m} \exp[j(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2)] - 1 = \frac{q_1 + mq_2}{1+m} (\cos(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2) + i \sin(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2)) - 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Из представленного выражения следует, что полное подавление неинформативного параметра возможно при выполнении следующих условий:

$$\frac{q_1 + mq_2}{1+m} = 1; \quad (7)$$

$$\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = 1; \quad \Delta\varphi_1 = -\Delta\varphi_2.$$

Условие (7) можно записать как $q_1 - 1 = -m(q_2 - 1)$, что с учетом q_1 и q_2 дает следующие выражения: $\Delta I_1 = -\Delta I_2$.

Полученные условия показывают, что в данном случае для полного подавления неинформативного параметра ток ΔI_1 должен компенсироваться соответствующим значением ΔI_2 .

Аналогично проведем оценку влияния некомпенсации по фазе и амплитуде для выражения (6).

Для сравнения с первым случаем примем аналогичные значения: $I_{10} = k_1 I_{20}$, $\Delta \varphi_2 = k_2 \Delta \varphi_1$, $\Delta \varphi_1 = 50^\circ$, $\Delta \varphi_2 = 50^\circ$, а коэффициентам, исходя из полученных соотношений в ходе эксперимента, присвоим $q_1 = 1,5$, $q_2 = 1,5$.

Результаты приведены в табл. 2, их графическое представление показано на рис. 5.

Таблица 2

Результаты изменения приведенной погрешности в зависимости от некомпенсации по амплитуде (k_1) и по фазе (k_2) для двухчастотного метода на одинаковых начальных фазах

$\gamma, \%$	k_1										
	1,0	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,2
k_2	1,02	4,06	4,06	4,07	4,08	4,09	4,10	4,12	4,14	4,16	4,18
	1,04	8,24	8,25	8,26	8,28	8,30	8,33	8,36	8,40	8,44	8,49
	1,06	12,54	12,56	12,57	12,60	12,64	12,68	12,73	12,78	12,85	12,92
	1,08	16,97	16,98	17,01	17,04	17,09	17,14	17,21	17,29	17,37	17,47
	1,1	21,51	21,53	21,56	21,60	21,66	21,73	21,82	21,92	22,02	22,14
	1,12	26,17	26,19	26,23	26,29	26,36	26,45	26,55	26,66	26,80	26,94
	1,14	30,95	30,98	31,02	31,09	31,17	31,28	31,40	31,54	31,69	31,87
	1,16	35,85	35,88	35,91	36,01	36,11	36,23	36,37	36,53	36,71	36,91
	1,18	40,87	40,91	40,96	41,06	41,17	41,31	41,47	41,65	41,86	42,09
	1,20	46,01	46,06	46,13	46,22	46,35	46,50	46,68	46,89	47,12	47,90

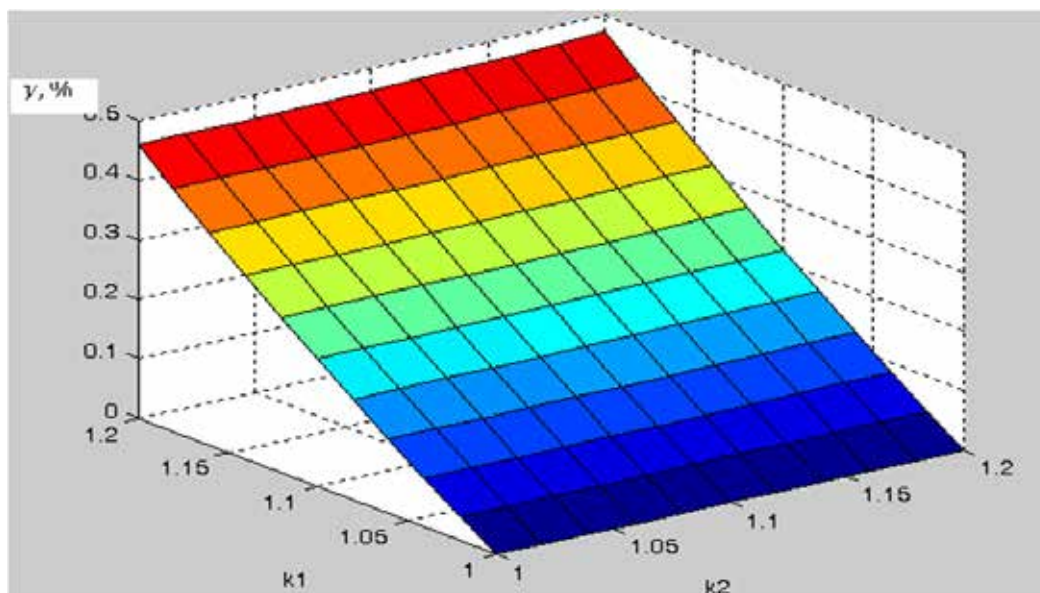


Рис. 5. График изменения приведенной погрешности в зависимости от некомпенсации по амплитуде (k_1) и по фазе (k_2) для двухчастотного метода на одинаковых начальных фазах

Судя по графику (рис. 5), наибольший вклад в изменение приведенной погрешности вносит некомпенсация по амплитуде. Таблица 2 позволяет сделать вывод, что при некомпенсации по амплитуде на 20 % приведенная погрешность будет составлять 46,01 %, при некомпенсации по фазе на 20 % приведенная погрешность будет равна 4,18 %, при совместной некомпенсации по фазе и амплитуде приведенная погрешность будет составлять 47,90 %.

Преимущество выражения (7) в том, что можно отдельно оценить влияние некомпенсации по фазе и по амплитуде на приведенную погрешность.

Таким образом, для решения задачи подавления неинформативной составляющей сигнала может быть применен двухчастотный метод с разными и одинаковыми начальными фазами. Исходя из определения приведенной погрешности наиболее точен при одних и тех же исходных данных двухчастотный метод с одинаковыми начальными фазами. Получены выражения для определения приведенной погрешности для каждого случая, проведен их сравнительный анализ. Рассмотрены возможные варианты некомпенсации неинформативного параметра по амплитуде и фазе. Используя выражения (2) и (6), можно определить диапазон изменения амплитуд и фаз, при которых значение приведенной погрешности не превысит предельно допустимое, заданное в техническом задании.

Библиографический список

1. Зыбов, В. Н. Оптимизация выбора параметров напряжения вспомогательной частоты при двухчастотном методе контроля / В. Н. Зыбов // Отбор и передача информации. – 1987. – Вып. 74. – С. 63–67.
2. Чураков, П. П. Измерители параметров катушек индуктивности : монография / П. П. Чураков, Б. Л. Свистунов. – Пенза : Из-во ПГУ, 1998. – 180 с.
3. Туз, Ю. М. Структурные методы повышения точности измерительных устройств / Ю. М. Туз. – Киев : Высш. шк., 1976. – 430 с.
4. Дорофеев, А. Л. Вихревые токи / А. Л. Дорофеев. – М. : Энергия, 1977. – 72 с.
5. Русин, Ю. С. Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры : справочник / Ю. С. Русин, И. Я. Гликман, А. Н. Горский. – М. : Радио и связь, 1991. – 224 с.
6. Соболев, В. С. Накладные и экранные датчики / В. С. Соболев, Ю. М. Шкарлетт. – Новосибирск : Наука, Сиб. отд., 1967. – 144 с.
7. Абрамов, С. В. Применение математического и физического моделирования при построении измерительных цепей вихретоковых датчиков для бесконтактного измерения перемещения / С. В. Абрамов, В. П. Маланин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 1. – С. 40–45.
8. Абрамов, С. В. Повышение информативной способности вихретоковых датчиков / С. В. Абрамов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 4. – С. 76–81.
9. Пат. № 2487314 Российская Федерация, МПК G 01 B 7/00, G 01 N 27/90. Вихретоковый преобразователь перемещений / Маланин В. П., Колганов В. Н., Пресняков М. Д., Абрамов С. В. ; заявитель и патентообладатель ОАО «НИИФИ». – № 2487314 ; заявл. 18.12.2000 ; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 19. – 11с.
10. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник : в 2 кн. / под общ. ред. В. В. Клюева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. – Кн. 2. – 352 с.
11. Зыбов, В. Н. Определение возможностей подавления мешающего параметра при много- и одночастотном амплитудно-фазовом методах / В. Н. Зыбов, Л. Я. Мизюк // Отбор и обработка информации. – 1989. – Вып. 80. – С. 48–61.

Абрамов Сергей Владимирович

ведущий инженер,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: abramov2011s@mail.ru

Abramov Sergey Vladimirovich

leading engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 621.3.014.14:621.3.088

Абрамов, С. В.

Применение двухчастотного метода выделения информативного сигнала при построении измерительных цепей первичных вихретоковых преобразователей / С. В. Абрамов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 82–89. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-12.

К. Ю. Крайнова

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛМАЗА

K. Y. Kraynova

MANUFACTURING TECHNOLOGY OF THE SEMICONDUCTOR SENSITIVE ELEMENT OF THE PRESSURE SENSOR BASED POLYCRYSTALLINE DIAMOND

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Актуальность статьи подтверждается повышенными требованиями к метрологическим характеристикам, предъявляемым к приборам в средствах выведения, космических аппаратах, пилотируемых комплексах и других отраслях промышленности, работающих в жестких условиях эксплуатации. Основной целью разработки высокоточного датчика давления является решение задач, направленных на увеличение диапазона температур и обеспечение долговременной стабильности. **Материалы и методы.** Проанализированы основные структуры и компоненты на основе полупроводниковых широкозонных материалов. Подробно рассмотрена структура датчика на основе поликристаллического алмаза, отличающегося от всех широкозонных материалов наилучшим сочетанием электрофизических параметров. Проведены экспериментальные исследования по созданию поликристаллических алмазных пленок, а также по созданию микрорельефа на их поверхности путем плазмохимического травления. **Результаты.** По результатам проведенных исследований выявлена возможность изготовления высокоточного датчика на основе поликристаллического алмаза. Технология получения пленок поликристаллического алмаза и обработки плазмохимическим травлением воспроизводима, однако целесообразно проведение дополнительных экспериментальных исследований по формированию структуры датчика кремний–диэлектрик–алмаз. **Выводы.** Предложенная структура датчика давления позволит использовать его для работы в диапазоне температур от минус 196 °С до плюс 300 °С и выше. Особые электрофизические параметры поликристаллического алмаза позволят применять датчик в условиях повышенной радиации.

A b s t r a c t. Background. Relevance of article is confirmed by increased requirements to the metrological characteristics required for measurements in the launch vehicles, spacecraft, manned space complexes and other industries operating in harsh environments. The main purpose of the development of high-precision pressure sensor is to solve problems, to increase the temperature range and ensuring long-term stability. **Materials and methods.** Analyzed the main structures and components based on semiconductor wide bandgap materials. Considered in detail the structure of the sensor on the basis of polycrystalline diamond, different from all the materials of wide best combination of electro-physical parameters. Experimental studies on the establishment of polycrystalline diamond films, as well as to create a microrelief on the surface by plasma-chemical etching. **Results.** The results of the study revealed the possibility of manufacturing high-precision sensor based on polycrystalline diamond. The technology of polycrystalline diamond films and processing by plasma etching is reproducible, but it is advis-

able to conduct additional experimental studies on the formation of the structure of the sensor silicon-insulator-diamond. **Conclusions.** The proposed structure of the pressure sensor will use it to work in a temperature range from $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ and above. Specific electrical parameters of polycrystalline diamond will allow to apply the sensor in high radiation environments.

К л ю ч е в ы е с л о в а: высокоточный датчик, поликристаллический алмаз, плазмо-химическое анизотропное травление, МЭМС-структура.

Key words: the high-precision sensor, polycrystalline diamond, the plasmachemical anisotropic etching, MEMS structure.

Развитие комплексной автоматизации в средствах выведения, космических аппаратах, пилотируемых комплексах и других отраслях промышленности требует применения датчиков различных физических величин, являющихся источником информации для автоматизированных систем контроля, управления или регулирования. Важной задачей создания датчиков является обеспечение требуемых метрологических характеристик системы, работающей в жестких условиях эксплуатации [1].

В настоящее время актуально создание высокоточных датчиков давлений, предназначенных для работы в диапазоне температур от минус $196\text{ }^{\circ}\text{C}$ до плюс $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше. Для такого диапазона температур в современной микроэлектронике применяют структуры и компоненты на основе полупроводниковых широкозонных материалов, из которых самыми перспективными являются следующие: «кремний-на-диэлектрике» (КНД) (рис. 1,а), карбид кремния (SiC) (рис. 1,б), а также пленки поликристаллического алмаза (рис. 1,в) [1–4].

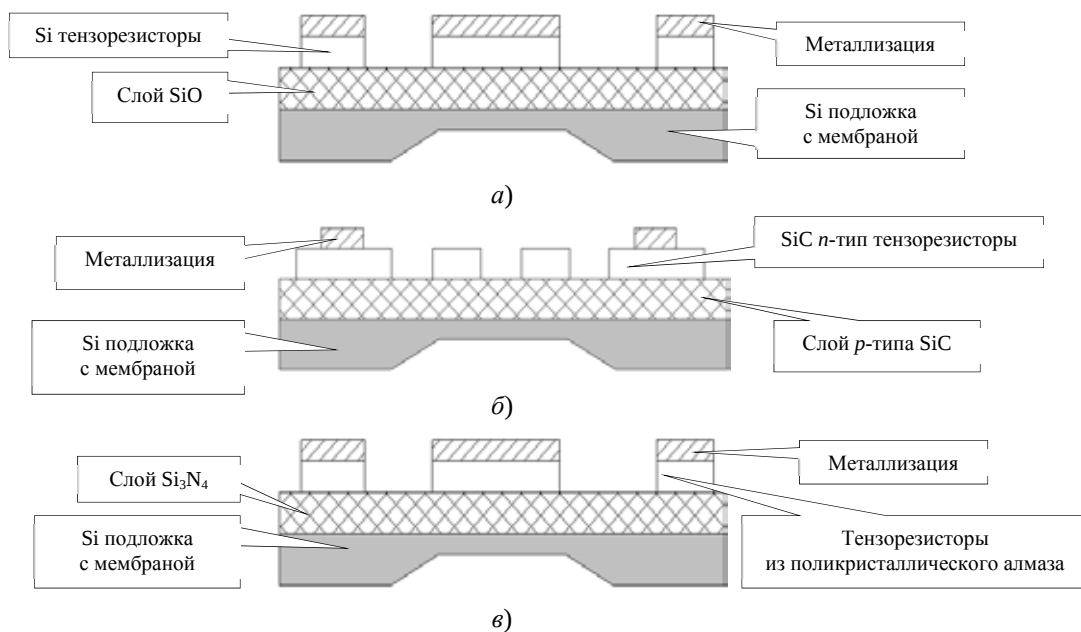


Рис. 1. Конструкции чувствительных элементов на основе перспективных структур и компонентов: а – «кремний-на-диэлектрике»; б – карбид кремния; в – пленки поликристаллического алмаза

Эффективность применения алмаза в датчиках давления объясняется тем, что из всех широкозонных полупроводников алмаз отличается наилучшим для твердотельных приборов сочетанием основных электрофизических параметров. Алмаз имеет низкую диэлектрическую проницаемость ($\epsilon = 5,7$), способствующую снижению диэлектрических потерь, высокие радиационную стойкость, дрейфовую скорость насыщения электронов и дырок ($\mu_e = 4500\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и $\mu_p = 3800\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$) и напряженность поля электрического пробоя (до 10^{10} В/м). У алмаза наибольшая среди всех известных материалов теплопроводность до $24\text{ Вт/см}\cdot\text{К}$. При применении технологии легирования алмаза его удельное сопротивление изменяется в широком интервале, что делает его еще более широкозонным с шириной запрещенной зоны до $5,7\text{ эВ}$ [2].

Кроме того, алмаз доступен для применения в электронике в широких масштабах, так как освоено его выращивание с использованием промышленного оборудования в виде пленок и пластин толщиной до 1 мм и площадью, ограниченной размерами реакционной камеры для его выращивания.

Относительным ограничением при применении пленок поликристаллического алмаза в чувствительном элементе микроэлектромеханических датчиков давления могут являться следующие недостатки:

- графитизация при температуре выше 600 °С в присутствии кислорода и превращение в графит при 900 °С во время проведения технологических операций;
- трудности механической обработки (шлифовки, полировки);
- проведение традиционных технологических операций для получения микрорельефа на поверхности поликристаллической алмазной пленки, причем отклонение от вертикальности стенок не должно превышать 10°.

Наиболее перспективным методом для получения сверхчистых поликристаллических алмазных пленок (АП) является CVD-метод синтеза алмаза с активацией газовой смеси сверхвысокочастотным разрядом [5, 6]. С помощью установки, представленной на рис. 2, можно регулировать и поддерживать основные параметры процесса осаждения алмазной пленки: давление, состав и скорость прокачки газовой смеси, температуру подложки. Автоматическая система управления позволяет осуществлять процессы с длительностью в десятки часов, обеспечивая синтез пленок различной толщины.

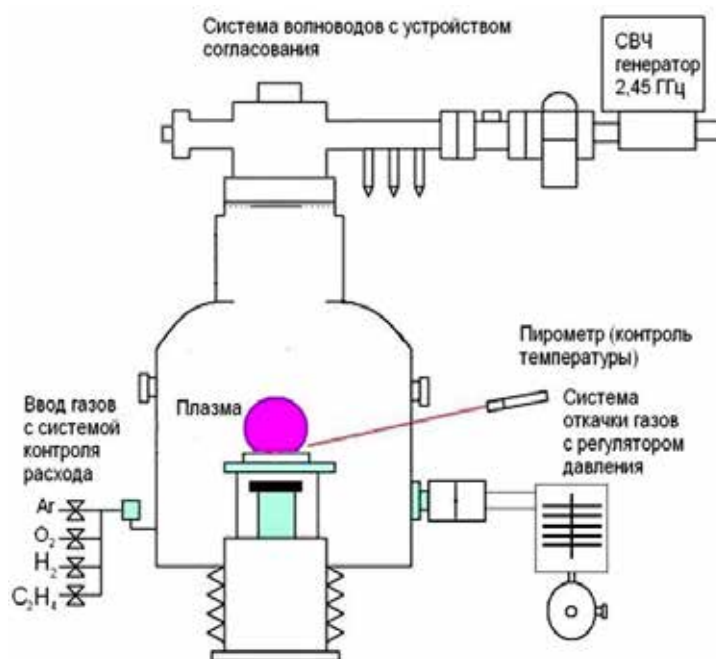


Рис. 2. Схема устройства CVD-установки

Наиболее распространенной и простой смесью, которую используют для синтеза АП, является смесь метан+водород ($\text{CH}_4 + \text{H}_2$), причем получение качественных пленок осуществляется при соотношении компонентов (0,3–1) % CH_4 – (99,7–99) % H_2 [7].

Типичное значение давления газа в камере составляет 5–20 кПа, а скорости осаждения – от 1 до 20 мкм/ч. В качестве подложек чаще всего используют кремний или молибден, но осаждать АП можно и на другие материалы, стойкие к нагреву до 1000 °С в присутствии атомарного водорода. Полученные АП могут быть химически отделены от подложки и использованы далее в виде пластин.

Таким образом, данный метод позволяет получать не только чистые поликристаллические АП толщиной от единиц микрон до нескольких миллиметров, но и получать отдельные пластины, которые в размерах достигают диаметра более 100 мм и толщиной порядка 5 мм.

Однако в настоящее время остается нерешенной задача возможности формирования заданного микрорельефа на поверхности алмазной пленки. Одной из проблем является получение канавки на поверхности АП с высоким аспектным соотношением и отклонением от вертикальной стенки не более 10° при глубине травления свыше 5 мкм.

Проведенные исследования показывают, что плазмохимическое «сухое» травление является наиболее подходящим для получения канавок в алмазе, причем эту операцию можно проводить почти в тех же условиях, в которых обычно проводится травление кремния [8, 9]. Но углерод, из которого состоит АП, образует летучие соединения с газами, применяемыми в плазмохимии травления полупроводников – водородом, кислородом, фтором. Однако достигнутые скорости травления в плазме настолько низки, что операция снятия нарушенного слоя длится много часов, что осложняет технологию. Для увеличения скорости травления алмаза необходимо пересмотреть основные технологии травления из-за сильных отличий свойств алмаза и кремния. Для алмаза будут существенными следующие изменения: повышение энергии ионов из-за генерации дефектов в кристалле, повышение температуры из-за увеличения скорости изотропного, ненаправленного, травления, а также необходимы дополнительные неравновесные воздействия на поверхность из-за облучения жесткими квантами [10]. Для алмаза, который является намного более стойким к любым видам радиации и химическим воздействиям, эти приемы должны привести к желаемому результату.

Для получения глубоких канавок с наименьшим углом отклонения от вертикальности стенок при плазмохимическом травлении возможно применение реакторов высокоплотной плазмы, в частности реакторов индуктивно-связанной плазмы (ICP) с использованием фторсодержащих газовых смесей $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ либо $\text{SF}_6 + \text{O}_2$ [9]. Данная технология предполагает высокую скорость глубокого травления АП (рис. 2) и высокую селективность процесса по отношению к маскирующим слоям, вместе с этим, обеспечивая корреляцию режимов, достигается высокая анизотропия процесса травления. Зависимость скорости плазмохимического травления алмаза в сравнении со скоростью травления кремния приведена на рис. 3.

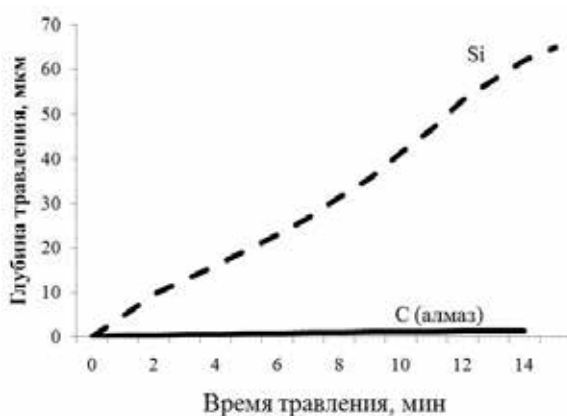


Рис. 3. Соотношение скоростей плазмохимического травления кремния и пленок поликристаллического алмаза

С другой стороны, сложной задачей является выбор маски для травления АП. Металлическую маску приходится применять, когда стойкости фоторезистивной маски или маски из другого материала недостаточно. Для достижения глубины травления АП в 1–2 мкм время «жизни» такой маски должно быть более 50 мин. Поэтому травление АП можно проводить при использовании медной маски. Применение металлической маски также облегчает процесс плазмохимического травления, так как при использовании обычных диэлектрических масок происходит зарядка поверхности, приводящая к появлению дефектов различного вида.

Существует ряд аспектов, которые влияют на скорость травления АП и на технологический процесс в целом:

1. Вытравливаемые канавки в микроэлектромеханических структурах находятся на расстоянии нескольких микрометров друг от друга, при этом важно не забыть, как данный аспект влияет на скорости травления структуры. Так, при травлении в АП канавки шириной 2–4 мкм

скорость составляет 0,3–0,5 мкм/мин, при увеличении канавки в несколько раз, скорость увеличивалась на 0,04–0,07 мкм/мин [10].

2. На скорость травления АП будет влиять и аспектное отношение получаемого рельефа, так как реальная скорость травления будет снижаться по мере увеличения данного отношения. Так, если у кремния наблюдается аспектное отношение более двух, то средняя скорость травления будет уменьшаться по простой линейной зависимости: $R = 156 - A$, где R – средняя скорость травления, A – аспектное отношение (рис. 4). Учитывая, что средняя скорость травления алмаза более чем в 10 раз меньше, то и связь с аспектным отношением будет жестче [9].

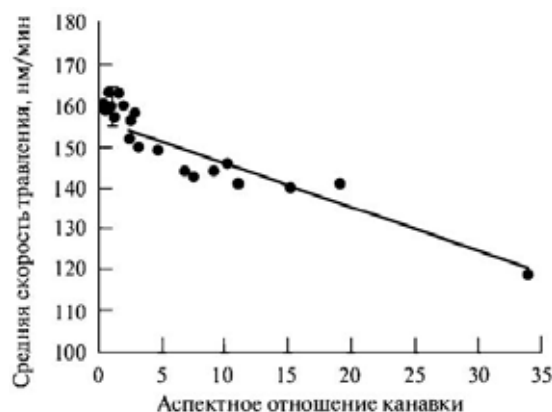


Рис. 4. Влияние аспектного отношения на среднюю скорость травления канавок кремния при давлении 5 Па

3. Помимо аспектного отношения на скорость травления влияет еще и давление (рис. 5), которое изменяет направление попадания активных «травящих» частиц и баланс между реакциями травления и осаждения в процессе травления микрорельефа. Это объясняется тем, что понижение давления приводит к увеличению средней энергии электронов и энергии падающих на подвергаемую травлению поверхность. Однако баланс давления очень важен; повышенное давление негативно влияет на микроструктуры и гребенки, получаемые травлением микрорельефа, разрушая их. Низкое давление повышает скорость травления, из-за чего образуются дефекты на поверхности пластины и стенках структуры, а при совсем низких давлениях плазма перестает зажигаться и процесс плазмохимического травления прекращается.

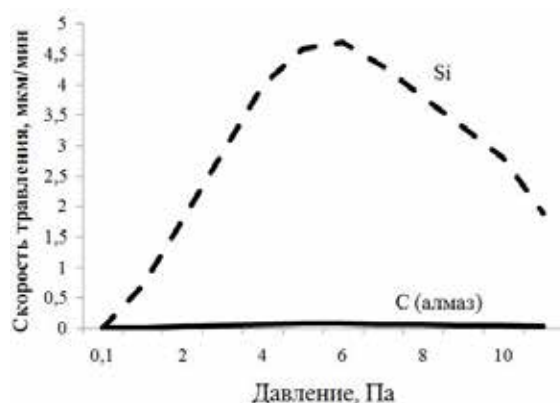


Рис. 5. Влияние давления в камере на скорость травления кремния и алмаза

4. Особое влияние оказывает расстояние между зоной генерации плазмы и пластиной. Эмпирическим путем было выявлено, что на расстоянии более чем 20 см травление алмаза прекращалось, для кремния данное расстояние превышало 25 см. Однако при увеличении процентного содержания в смеси газов кислорода данное расстояние становится незначительным. Так, увеличение процентного содержания кислорода в рабочем газе повышает скорость

травления пленки, однако локальный минимум скорости травления наблюдался при 90 % содержании O_2 в смеси, как видно из рис. 6 [11].

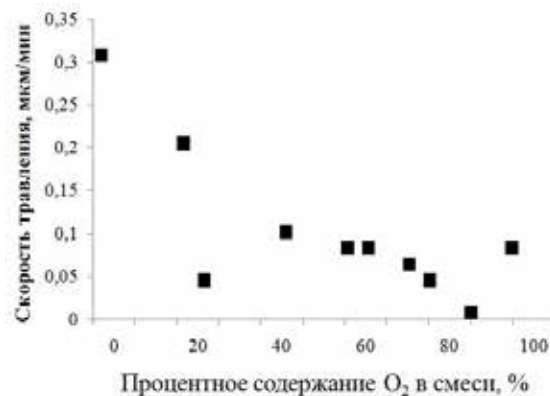


Рис. 6. Зависимость скорости травления алмаза в плазме $O_2 + SF_6$ от процентного содержания O_2 в смеси

Экспериментальные исследования показывают, что в случае повышения температуры травления пластина из кремния играет роль эффективного теплоотвода. Для этого образец выращенной алмазной пластины приклеивается к кремниевой пластине с помощью вакуумной смазки. Данная конструкция помещалась в камеру высокоплотной плазмы. Скорость травления определялась из измерений оптическим профилометром по величине ступеньки травления, протравленной за определенное время. Таким образом, при проведении травления в среднем в течение 12–15 мин в смеси газов в соотношении $Ar:O_2:SF_6:10:20:2$ см³/м при мощности источника порядка 0,8–1 кВт в присутствии стандартной частоты ICP-источника $f = 13,56$ МГц и при среднем давлении 2–10 Па, вертикальность стенок достигала 80°, что приемлемо для получения резистивной структуры на основе поликристаллического алмаза [9, 12].

Проведенные исследования показывают, что современные технологии, использующие поликристаллический алмаз, позволяют создавать микрорельефы с различными формами и геометрическими размерами. В этой связи применение поликристаллического алмаза является перспективным технологическим решением для создания на их основе микроэлектронных датчиков давления для особо жестких условий эксплуатации по сравнению с использованием известных структур (ЧЭ на основе КНД-структуры, ЧЭ на основе SiC).

Библиографический список

1. Мокров, Е. А. Разработка высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / Е. А. Мокров, И. Н. Баринов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 1. – С. 23–27.
2. Баринов, И. Н. Особенности применения и разработки микроэлектронных датчиков давления на основе поликристаллического алмаза для работы в особо жестких условиях эксплуатации / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Приборы. – 2013. – № 9. – С. 12–19.
3. Баринов, И. Н. Высокотемпературные полупроводниковые датчики давления с повышенной временной стабильностью / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2011. – № 8. – С. 51–55.
4. Абдуллин, Ф. А. Технологические особенности формирования кремниевых пьезорезистивных акселерометров с расширенным температурным диапазоном измерений / Ф. А. Абдуллин, В. Е. Пауткин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 118–123.
5. Ральченко, В. CVD-алмазы. Применение в электронике / В. Ральченко, В. Конов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2007. – № 4. – С. 58–67.
6. Вопросы создания высокотемпературных датчиков физических величин. Материалы. Конструкции. Технологии / П. Г. Михайлов, Е. А. Мокров, В. В. Скотников, Д. А. Тютюников, В. А. Петрин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 4 (6). – С. 61–70.
7. CVD Diamond for Electronic Devices and Sensors / ed. by Ricardo S. Sussmann. – Chichester : John Wiley & Sons, Ltd., 2009.

8. Галперин, В. А. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях : учеб. пособие / В. А. Галперин, Е. В. Данилкин, А. И. Мочалов ; под ред. С. П. Тимошенкова. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 283 с.
9. Tran, D. T. Microwave plasma-assisted etching of diamond / D. T. Tran, T. A. Grotjohn, D. K. Reinhard, J. Asmussen // *Diamond & Related Materials*. – 2008. – Issues 4-5. – С. 717–721.
10. Технология СБИС : в 2 кн. : пер. с англ. / под ред. С. Зи. – М. : Мир, 1986. – Кн. 2. – 453 с.
11. Амиров, И. И. Плазмохимическое травление природного алмаза / И. И. Амиров, А. Н. Магунов // *Intermatic-2010 : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф.*, 23 – 27 ноября 2010 г. – М., 2010. – Ч. 2. – С. 228–231.
12. Sandru, G. S. Reactive ion etching of diamond / G. S. Sandru, W. K. Chu // *Appl. Phys. Lett.* 1989. – Vol. 55, № 5. – P. 437–439.

Крайнова Ксения Юрьевна

магистрант, инженер-технолог,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: ksenya.kraynova.94@mail.ru

Kraynova Kseniya Yur'evna

graduate student, process engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 621.3.032

Крайнова, К. Ю.

Технология изготовления полупроводникового чувствительного элемента датчика давления на основе поликристаллического алмаза / К. Ю. Крайнова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 90–96. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-13.

А. К. Гришко, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛИЗА СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИИ¹

A. K. Grishko, I. I. Kochegarov, A. V. Lysenko

MULTICRITERIAL CHOICE OF THE OPTIMAL VARIANT OF A COMPLEX TECHNICAL SYSTEM BASED ON THE INTERVAL ANALYSIS OF WEAKLY STRUCTURED INFORMATION

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования являются сложные технические системы, которые характеризуются разнородными критериями качества и параметрами, заданными диапазонами их изменений. Предметом исследования являются многофункциональные модели формирования и ранжирования вариантов систем. Цель работы состоит в разработке методики выбора предпочтительного варианта системы по совокупности разнородных критериев качества, заданных в интервальном виде. **Материалы и методы.** Предлагаемый подход базируется на комплексном применении методов интервального анализа, теории нечетких множеств и теории принятия решений. Анализ табличных данных основан на применении теории матриц. **Результаты.** Разработан способ нормализации разнородных критериев качества, основанный на построении отношений предпочтения интервального вида. Построение комплексного вектора критериев качества позволяет получить методику многокритериального выбора варианта сложной радиоэлектронной системы на множестве возможных альтернатив. **Выводы.** В отличие от известных методов с жестким ранжированием, метод построения предпочтений интервального вида на множестве альтернативных вариантов систем по векторным разнородным критериям качества предлагает вместо коэффициентов, учитывающих важность критериев, применять функции принадлежности, которые показывают степень близости варианта реализации систем к эффективному или Парето-оптимальному вариантам. Рассмотрен пример оптимального построения радиоэлектронной системы, но предлагаемый метод может найти применение не только в технике, но также и при решении других прикладных задач оптимизации в экономике или социальной сфере.

A b s t r a c t. Background. The object of the research is complex technical systems that are characterized by heterogeneous quality criteria and parameters set by the ranges of their

¹ Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Адаптивная интеллектуальная система вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и авиационной техники нового поколения на основе многофункциональной цифровой генерации испытательных сигналов» (Соглашение № 17-79-10281 от 24.07.2017) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

changes. The subject of the study are multifunctional models for the formation and ranking of system variants. The aim of the work is to develop a methodology for selecting the preferred system variant for a set of heterogeneous quality criteria specified in interval form. **Materials and methods.** The proposed approach is based on the complex application of methods of interval analysis, fuzzy sets theory and decision theory. Analysis of tabular data is based on the application of the theory of matrices. **Results.** A method for normalizing heterogeneous quality criteria is developed based on the construction of preferences relations of interval type. The construction of a complex vector of quality criteria allows one to obtain a methodology for multi-criteria choice of a variant of a complex radio electronic system on a set of possible alternatives. **Conclusions.** Unlike well-known methods with rigid ranking, the method of constructing interval-type preferences on a set of alternative variants of systems based on vector heterogeneous quality criteria suggests using membership functions that instead of factors taking into account the importance of criteria that show the degree of proximity of the implementation of systems to the effective or Pareto-optimal variants. An example of the optimal construction of a radio electronic system is considered in the article, but the proposed method can find application not only in engineering, but also in solving other applied optimization problems in the economy or social sphere.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сложная техническая система, критерии качества, интервальный анализ, векторная оптимизация.

Key words: complex technical system, quality criteria, interval analysis, vector optimization.

Введение

На ранних этапах проектирования сложных технических систем (СТС) очень важно определить оптимальный вариант структуры из множества их возможных альтернатив. Этот выбор осуществляется по множеству разнородных критериев качества, которые могут задаваться:

- в формализованном, количественном виде;
- в неопределенном, лингвистическом виде;
- в частично формализованном виде.

В процессе решения этой задачи часто оказывается, что большое количество показателей исследуемых СТС заданы в виде диапазонов изменения их величин. Например, у радиоэлектронной системы (РС) это диапазоны рабочих частот, полоса пропускания, значения и диапазоны изменения входных и выходных параметров сигнала, эксплуатационные пределы перепадов температур в узлах и модулях РС, вес, стоимость и т.д.

Это создает определенные трудности при выборе оптимальной структуры СТС, которые связаны с тем, что сложно объективно сравнивать улучшение значения некоторого критерия с ухудшением значения другого критерия, если эти критерии представлены в измерительных шкалах, имеющих разнородный характер.

Для нахождения решений в задачах подобного класса можно использовать нечеткие [1, 2] и интервальные методы [3–5].

Международный стандарт на обозначения в интервальном анализе был принят на заседании рабочей группы по стандартизации интервальных вычислений IEEE P1788 в конце 2008 г. (IEEE Interval Standard Working Group – P1788).

Методы оптимизации сложных систем по критериям оптимальности интервального вида получили свое развитие в 90-х гг. прошлого столетия, но в то же время все проблемы еще до конца не решены и очень часто встречаются при решении прикладных задач оптимизации.

Предлагаемый в статье метод позволяет производить многокритериальное ранжирование альтернативных вариантов СТС, которые характеризуются интервальными характеристиками, путем приведения к единой величине и виду исходных данных, удобных для сравнения.

Постановка задачи

При моделировании реальных систем могут быть такие ситуации, когда у лица, принимающего решение (ЛПР), нет четкого представления об отношении предпочтения между всеми или некоторыми альтернативами, а можно лишь оценить степень выполнения того или иного предпочтения между парами альтернатив в виде числа из интервала $[0;1]$. В таком случае с помощью ЛПР (или эксперта) можно ввести нечеткое отношение предпочтения.

Нечетким отношением предпочтения R на множестве X называется нечеткое подмножество декартова произведения $X \times X$, характеризующееся функцией принадлежности $\mu_R: X \times X \rightarrow [0,1]$. Значение $\mu_R(x,y)$ этой функции понимается как субъективная мера или степень выполнения отношения x к y .

Для решения задачи, позволяющего сравнивать неоднородные критериальные значения, необходимо построить нечеткие отношения предпочтения интервального вида (НОПИВ), для чего введем следующие обозначения на основании [2, 4, 5]: $S = \{S_\alpha, \alpha = \overline{1, n}\}$ – множество возможных альтернативных вариантов структурного построения СТС; $K_i(S_\alpha) = [\underline{K}_i(S_\alpha); \overline{K}_i(S_\alpha)]$ – частные критерии оптимальности, заданные в интервальном виде, характеризующие каждый отдельный вариант системы S_α , где $\underline{K}_i(S_\alpha)$ – нижняя граница интервала критериальной оценки, а $\overline{K}_i(S_\alpha)$ – верхняя граница интервала, $i = \overline{1, r}$; $\alpha = \overline{1, n}$; $K(S_\alpha) = \{K_1(S_\alpha), K_2(S_\alpha), \dots, K_r(S_\alpha)\} = \{[\underline{K}_1(S_\alpha); \overline{K}_1(S_\alpha)], [\underline{K}_2(S_\alpha); \overline{K}_2(S_\alpha)], \dots, [\underline{K}_r(S_\alpha); \overline{K}_r(S_\alpha)]\}$ – векторный критерий, характеризующий каждый вариант системы; $S^P \subset S$ – множество эффективных (парето-оптимальных) вариантов системы с числом элементов n^P ; $P = (S_{k_1}^0, S_{k_2}^0, \dots, S_{k_{n^P}}^0)$ – упорядоченное множество эффективных вариантов (кортеж Парето), для элементов $S_{k_j}^0 \in S^P$ которого справедливо

$$S_{k_1}^0 \succ S_{k_2}^0 \succ \dots \succ S_{k_{n^P}}^0, \quad (1)$$

где « $\succ$ » – знак отношения доминирования, $k_j \in \overline{1, n^P}$. Длина кортежа равна n^P .

С учетом введенных обозначений сформулируем задачу.

Требуется найти упорядоченное множество эффективных вариантов структурного построения сложной системы (кортеж Парето) (1), для элементов $S_{k_j}^0$ которого в зависимости от смысла задачи выполняются условия:

$$K_i(S_{k_j}^0) = \min_{i=1, r; \alpha=1, n} [\underline{K}_i(S_\alpha)], S_{k_j}^0 \in S^P, \quad (2)$$

или

$$K_i(S_{k_j}^0) = \max_{i=1, r; \alpha=1, n} [\underline{K}_i(S_\alpha)], S_{k_j}^0 \in S^P \quad (3)$$

для случая, когда скалярные критерии оптимальности $K_i(S_\alpha) = [\underline{K}_i(S_\alpha); \overline{K}_i(S_\alpha)]$ представлены в интервальном виде.

Обычный (не интервальный) скалярный критерий $K_i(S_\alpha)$ целесообразно рассматривать как частный случай интервального критерия, который представлен в виде вырожденного интервала $[1-3]$, т.е. интервала с совпадающими концами $K_i(S_\alpha) = \underline{K}_i(S_\alpha) = \overline{K}_i(S_\alpha)$.

Построение интервальных отношений предпочтения на множестве сложных систем, характеризующихся скалярными разнородными критериями оптимальности

При построении реальных СТС различного назначения встречаются ситуации (являющиеся, скорее, правилом, чем исключением), когда у ЛПР нет четкого представления о предпочтениях между всеми или некоторыми из альтернативных вариантов [5–7]. Кроме того, только при наличии условия, обеспечивающего сравнимость частных критериев, возможно в дальнейшем построение принципа оптимальности и вытекающих из него алгоритмов решения многокритериальных задач. Несравнимость частных критериев является основной особенностью и главным препятствием к решению задач многокритериальной оптимизации [8–10]. Представленные обстоятельства существенно усиливаются в условиях, когда частные критерии не только неаддитивные, но еще и представлены в интервальном виде, с различными диапазонами отклонения качества от лучшего до худшего значения.

На основе перечисленного выше предлагается на основе анализа множества упорядоченных пар S_k и S_l ($S_k \in S$ и $S_l \in S$, где $k = \overline{1, n}$; $l = \overline{1, n}$; $k \neq l$) вариантов сложной системы $S = \{S_\alpha, \alpha = \overline{1, n}\}$ по аналогии с нечеткими отношениями предпочтения [5, п. 1.2.1] ввести отношение предпочтения интервального вида $R^u K_i(S_k, S_l)$ по i -му частному интервальному критерию оптимальности $K_i(S_\alpha) = [K_i(S_\alpha); \overline{K_i(S_\alpha)}]$, $i = \overline{1, r}$, $\alpha = \overline{1, n}$, и для пары систем (S_k, S_l) определить интервальной функцией принадлежности $\mu^u K_i(S_k, S_l)$. Результаты анализа предлагается заносить в специальную оценочную матрицу $\mu^u K_i(S_k, S_l)$. При сравнении систем S_k и S_l k -системы необходимо располагать в строках, а l -системы – в столбцах.

Элементы $\mu^u K_i(S_k, S_l)$ оценочной матрицы с учетом подходов, изложенных в работах [4, 5], определяются по выражению

$$\mu^u K_i(S_k, S_l) = \frac{K_i(S_k) - K_i(S_l)}{m_i} = \frac{[K_i(S_k); \overline{K_i(S_k)}] - [K_i(S_l); \overline{K_i(S_l)}]}{m_i} = \frac{[\min\{K_i(S_k) - K_i(S_l); \overline{K_i(S_k)} - \overline{K_i(S_l)}\}; \max\{K_i(S_k) - K_i(S_l); \overline{K_i(S_k)} - \overline{K_i(S_l)}\}]}{m_i}, \quad (4)$$

где $K_i(S_k)$ и $K_i(S_l)$ – значения i -го скалярного критерия для систем S_k и S_l ; m_i – ширина интервала оценок по i -му частному критерию оптимальности [2, 6–8]. Средством числового представления критериев выступают интервальные значения, которые показывают допустимое отклонение качества варианта системы от худшего до лучшего (т.е. от минимального до максимального) в определенном диапазоне.

Важным моментом в данном случае является назначение величины m_i . При необходимости можно использовать в качестве m_i : предельно допустимые значения критериев оптимальности эталонной системы; предельно допустимые значения критериев оптимальности, которые хотелось бы достигнуть в ходе решения задачи оптимизации; в задачах контроля – предельно допустимые значения контролируемых параметров и т.д.

В результате функция принадлежности $\mu^u K_i(S_k, S_l)$ для пары систем (S_k, S_l) , характеризующая степень согласия с тем, что система S_k доминирует над системой S_l по i -му частному интервальному критерию, будет также представлена в интервальном виде:

$$\mu^u K_i(S_k, S_l) = [\mu^u K_i(S_k, S_l); \overline{\mu^u K_i(S_k, S_l)}].$$

Отличительной особенностью рассматриваемого подхода от методов теории нечетких множеств [1, 2, 5] является определение интервальной функции принадлежности в интервале $[-1; 1]$.

Таким образом, нечетким отношением предпочтения интервального вида R^u на множестве S_α называется множество декартова произведения $(S_k \times S_l, \text{ где } k = \overline{1, n}; l = \overline{1, n}; k \neq l)$, характеризующееся интервальной функцией принадлежности $\mu^u K_i(S_k, S_l): S_k \times S_l \rightarrow [-1; 1]$. Значение этой функции $\mu^u K_i(S_k, S_l) = [\underline{\mu^u K_i(S_k, S_l)}; \overline{\mu^u K_i(S_k, S_l)}]$ понимается как объективная мера степени выполнения отношения $S_k R^u S_l$ по скалярному критерию оптимальности

$$K_i(S_\alpha) = [\underline{K_i(S_\alpha)}; \overline{K_i(S_\alpha)}], (i = \overline{1, r}, \alpha = \overline{1, n}),$$

заданному в интервальном виде, характеризующему каждый отдельный вариант системы S_α , где $\underline{\mu^u K_i(S_k, S_l)} \in [-1; 0]$ – значение, характеризующее максимальную степень потерь при признании системы S_k , доминирующей систему S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i ; $\overline{\mu^u K_i(S_k, S_l)} \in [0; 1]$ – значение, характеризующее максимальную степень выигрыша при признании системы S_k , доминирующей систему S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i ; $\underline{\mu^u K_i(S_k, S_l)} \in [-1; 0]$ означает абсолютное отсутствие доминирования системы S_k над системой S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i ; $\overline{\mu^u K_i(S_k, S_l)} \in [0; 1]$ означает абсолютное доминирование системы S_k над системой S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i ; $[\underline{\mu^u K_i(S_k, S_l)}; \overline{\mu^u K_i(S_k, S_l)}] \in [-1; 1]$ – интервальное значение, характеризующее степень выигрыша и степень потерь при признании системы S_k , доминирующей систему S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i .

Введем отношение строгого интервального предпочтения системы S_k над системой S_l и определим его функцией принадлежности $\mu_D^u K_i(S_k, S_l)$, характеризующей интенсивность доминирования системы S_k над системой S_l по i -му частному интервальному критерию оптимальности в виде

$$\begin{aligned} \mu_D^u K_i(S_k, S_l) &= \mu^u K_i(S_k, S_l) - \mu^u K_i(S_l, S_k) = \\ &= [\underline{\mu^u K_i(S_k, S_l)}; \overline{\mu^u K_i(S_k, S_l)}] - [\underline{\mu^u K_i(S_l, S_k)}; \overline{\mu^u K_i(S_l, S_k)}] = \\ &= [\min\{\underline{\mu^u K_i(S_k, S_l)} - \underline{\mu^u K_i(S_l, S_k)}; \overline{\mu^u K_i(S_k, S_l)} - \overline{\mu^u K_i(S_l, S_k)}\}; \\ &\quad \max\{\underline{\mu^u K_i(S_k, S_l)} - \overline{\mu^u K_i(S_l, S_k)}; \overline{\mu^u K_i(S_k, S_l)} - \underline{\mu^u K_i(S_l, S_k)}\}] \end{aligned} \quad (5)$$

Результаты сравнения $\mu^u K_i(S_k, S_l)$ и $\mu^u K_i(S_l, S_k)$, ($\forall S_k$ и S_l) будем заносить в оценочную матрицу $\mu_D^u K_i(S_k, S_l)$.

Введем отношение интервального недоминирования системы S_k над системой S_l и определим его функцией принадлежности $\mu_{ND}^u K_i(S_k, S_l)$ как дополнение к $\mu_D^u K_i(S_k, S_l)$ в виде

$$\mu_{ND}^u K_i(S_k, S_l) = \begin{cases} 1, & \text{если } \mu_D^u K_i(S_k, S_l) < 0, \\ 1 - \mu_D^u K_i(S_k, S_l), & \text{если } \mu_D^u K_i(S_k, S_l) \geq 0. \end{cases} \quad (6)$$

Степень недоминируемости системы S_k ни одной другой системой по i -му скалярному интервальному критерию оптимальности характеризуется [11–13] функцией принадлежности множеству недоминируемых систем $\mu_D^* K_i(S_k)$ в виде

$$\mu_D^* K_i(S_k) = \min \mu_{ND}^u K_i(S_k, S_l). \quad (7)$$

Значение функции принадлежности $\mu_D^* K_i(S_k)$ показывает степень близости варианта по рассматриваемому i -му частному интервальному критерию оптимальности.

Если в процессе решения, в зависимости от смысла задачи, необходимо выполнить условие (2), то выбор значения $\mu_D^* K_i(S_k)$ необходимо осуществлять из k -й строки оценочной матрицы $\mu_{ND} K_i(S_k, S_l)$.

Если в процессе решения, в зависимости от смысла задачи, необходимо выполнить условие (3), то выбор значения $\mu_D^* K_i(S_k)$ необходимо осуществлять из l -й строки оценочной матрицы $\mu_{ND} K_i(S_k, S_l)$.

Величину $\mu_D^* K_i(S_k)$ будем рассматривать как меру предпочтения, обеспечивающую объективный и адекватный реальности способ сравнения сложных систем, характеризующийся разнородными интервальными критериальными значениями, и устанавливающую значение приоритета при выборе [10, 13–15].

Необходимо отдать предпочтение одной из трех систем $\{S_1, S_2, S_3\}$, характеризующихся четырьмя критериями качества $K_1(S_\alpha), K_2(S_\alpha), K_3(S_\alpha), K_4(S_\alpha)$, значения которых заданы в интервальном виде, остальные системы расположить в порядке убывания предпочтения.

Варианты систем, значения критериев оптимальности и ширина интервала оценок по i -му частному критерию представлены в табл. 1, при этом должны выполняться условия:

$$K_1(S_\infty^*) = \min_{\alpha=1,3} [K_1(S_\alpha)], \quad (8)$$

$$K_2(S_\infty^*) = \max_{\alpha=1,3} [K_2(S_\alpha)], \quad (9)$$

$$K_3(S_\infty^*) = \max_{\alpha=1,3} [K_3(S_\alpha)], \quad (10)$$

$$K_4(S_\infty^*) = \min_{\alpha=1,3} [K_4(S_\alpha)], \quad (11)$$

Таблица 1

Пример многокритериального выбора варианта радиоэлектронной системы

Критерии $K_i(S_\alpha)$	Варианты систем			
	S_1	S_2	S_3	m_i
$K_1(S_\alpha)$ – стоимость (тыс. руб.)	[500; 700]	[400; 900]	[550; 650]	1000
$K_2(S_\alpha)$ – надежность, наработка на отказ (тыс. ч)	[40; 70]	[60; 90]	[50; 80]	100
$K_3(S_\alpha)$ – устойчивость к динамическим нагрузкам (балл)	[5; 7]	[4; 6]	[6; 8]	10
$K_4(S_\alpha)$ – масса (кг)	[5; 8]	[7; 9]	[3; 6]	10

Критерии $K_1(S_\alpha), K_2(S_\alpha), K_3(S_\alpha), K_4(S_\alpha)$ являются разнородными, измеряемыми в различных шкалах, с различными диапазонами отклонения качества. Помимо того, условия (8) и (11) являются диаметрально противоположным условиям (9) и (10).

Порядок решения задачи многокритериального выбора оптимального варианта системы

Используя выражения (4), определяем $\mu^u K_1(S_1, S_2)$:

$$\begin{aligned} \mu^u K_1(S_1, S_2) &= \frac{[500; 700] - [400; 900]}{1000} = \frac{[\min\{500 - 400; 700 - 900\}; \max\{500 - 400; 700 - 900\}]}{1000} = \\ &= \frac{[-200; 100]}{1000} = [-0, 2; 0, 1]. \end{aligned}$$

Аналогичным образом рассчитываем данные для $\mu^u K_1(S_k, S_l)$, $\mu^u K_2(S_k, S_l)$, $\mu^u K_3(S_k, S_l)$ и заносим их в табл. 2.

Таблица 2

Оценочная матрица $\mu^u K_1(S_k, S_l)$

Варианты систем S_k	Варианты систем S_l		
	S_1	S_2	S_3
$\mu^u K_1(S_k, S_l)$			
S_1	–	$[-0, 2; 0, 1]$	$[-0, 05; 0, 05]$
S_2	$[-0, 1; 0, 2]$	–	$[-0, 15; 0, 25]$
S_3	$[-0, 05; 0, 05]$	$[-0, 25; 0, 15]$	–
$\mu^u K_2(S_k, S_l)$			
S_1	–	$[-0, 2; -0, 2]$	$[-0, 1; -0, 1]$
S_2	$[0, 2; 0, 2]$	–	$[0, 1; 0, 1]$
S_3	$[0, 1; 0, 1]$	$[-0, 1; -0, 1]$	–
$\mu^u K_3(S_k, S_l)$			
S_1	–	$[0, 1; 0, 1]$	$[-0, 1; -0, 1]$
S_2	$[-0, 1; -0, 1]$	–	$[-0, 2; -0, 2]$
S_3	$[0, 1; 0, 1]$	$[0, 2; 0, 2]$	–
$\mu^u K_4(S_k, S_l)$			
S_1	–	$[-0, 2; -0, 1]$	$[0, 2; 0, 2]$
S_2	$[0, 1; 0, 2]$	–	$[0, 3; 0, 4]$
S_3	$[-0, 2; -0, 2]$	$[-0, 4; -0, 3]$	–

После этого, используя выражения (5), находим $\mu_D^u K_i(S_k, S_l)$:

$$\begin{aligned} \mu_D^u K_1(S_1, S_2) &= [-0, 2; 0, 1] - [-0, 1; 0, 2] = \\ &= \left[\min\{-0, 2 - (-0, 1); 0, 1 - 0, 2\}; \max\{-0, 2 - (-0, 1); 0, 1 - 0, 2\} \right] = -0, 1. \end{aligned}$$

Аналогично рассчитывается $\mu_D^u K_1(S_k, S_l)$; $\mu_D^u K_2(S_k, S_l)$; $\mu_D^u K_3(S_k, S_l)$. Полученные данные заносим в табл. 3.

Таблица 3

Оценочная матрица $\mu_D^u K_i(S_k, S_l)$

Варианты систем S_k	Варианты систем S_l			
	S_1	S_2	S_3	
1	2	3	4	5
$\mu_D^u K_1(S_k, S_l)$				
S_1	–	–0,1	0	
S_2	0,1	–	0,1	
S_3	0	–0,1	–	

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5
$\mu_D^u K_2(S_k, S_l)$				
S_1	–	–0,4	–0,2	
S_2	0,4	–	0,2	
S_3	0,2	–0,2	–	
$\mu_D^u K_3(S_k, S_l)$				
S_1	–	0,2	–0,2	
S_2	–0,2	–	–0,4	
S_3	0,2	0,4	–	
$\mu_D^u K_4(S_k, S_l)$				
S_1	–	–0,3	0,4	
S_2	0,3	–	0,7	
S_3	0,4	–0,7	–	

Используя выражения (6), вычисляем значения $\mu_{ND} K_1(S_k, S_l)$, $\mu_{ND} K_2(S_k, S_l)$, $\mu_{ND} K_3(S_k, S_l)$. Данные заносим в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Оценочная матрица $\mu_{ND} K_1(S_k, S_l)$ и $\mu_{ND} K_4(S_k, S_l)$

Варианты систем S_k	Варианты систем S_l			
	S_1	S_2	S_3	$\mu_D^* K_1(S_k)$
S_1	–	1	1	1
S_2	0,9	–	0,9	0,9
S_3	1	1	–	1
$\mu_D^* K_4(S_k)$				
S_1	–	1	0,6	0,6
S_2	0,7	–	0,3	0,3
S_3	0,6	1	–	0,6

Таблица 5

Оценочная матрица $\mu_{ND} K_2(S_k, S_l)$ и $\mu_{ND} K_3(S_k, S_l)$

Варианты систем S_k	Варианты систем S_l		
	S_1	S_2	S_3
$\mu_{ND} K_2(S_k, S_l)$			
S_1	–	1	1
S_2	0,6	–	0,8
S_3	0,8	1	–
$\mu_D^* K_2(S_k)$	0,6	1	0,8
$\mu_{ND} K_3(S_k, S_l)$			
S_1		0,8	1
S_2	1		1
S_3	0,8	0,6	
$\mu_D^* K_3(S_k)$	0,8	0,6	1

$\mu_D^* K_3(S_k)$ для каждого критерия заносим в табл. 6.

Таблица 6

Оценочная матрица $\mu_D^* K_3(S_k)$

Варианты систем S_k	$\mu_D^* K_i(S_k)$			
	$\mu_D^* K_1(S_k)$	$\mu_D^* K_2(S_k)$	$\mu_D^* K_3(S_k)$	$\mu_D^* K_4(S_k)$
S_1	1	0,6	0,8	0,6
S_2	0,9	1	0,9	0,3
S_3	1	0,8	1	0,6

Как уже говорилось выше, $\mu_D^* K_i(S_k)$ определяются в диапазоне $[0;1]$, в котором $\mu_D^* K_i(S_k)=1$, значит, система S_k будет являться лучшей по i -му скалярному критерию на множестве рассматриваемых систем, 0 – худшей, а значение из диапазона $[0;1]$ показывает значение величины приоритета системы при выборе. Чем больше это значение, тем предпочтительнее система S_k по i -му скалярному критерию оптимальности.

Таким образом, все интервальные критериальные оценки приведены к общему виду, удобному для сравнения при решении задач многокритериальной оптимизации.

Построение оценочных матриц предпочтения на множестве альтернатив по векторному неоднородному критерию оптимальности

На основе анализа $\mu_D^* K_i(S_k)$ и $\mu_D^* K_i(S_l)$ проведем попарное сравнение систем S_k и S_l и определим элементы C_{kl}^μ оценочной матрицы C_{kl}^μ (табл. 7), где $k=\overline{1,n}$; $l=\overline{1,n}$; $k \neq l$, по формуле

$$C_{kl}^\mu = \sum_{i=1}^r \mu_D^* K_i(S_k) / \sum_{i=1}^r \mu_D^* K_i(S_l), \quad C_{kl}^\mu = \frac{1}{C_{lk}^\mu};$$

$$C_{12}^\mu = \frac{\mu_D^* K_1(S_1) + \mu_D^* K_2(S_1) + \mu_D^* K_3(S_1) + \mu_D^* K_4(S_1)}{\mu_D^* K_1(S_2) + \mu_D^* K_2(S_2) + \mu_D^* K_3(S_2) + \mu_D^* K_4(S_2)} = \frac{1 + 0,6 + 0,8 + 0,6}{0,9 + 1 + 0,9 + 0,3} = 0,968.$$

Таблица 7

Матрица предпочтений C_{kl}^μ

Варианты систем S_k	Варианты систем S_l		
	S_1	S_2	S_3
S_1	–	0,968	0,882
S_2	1,033	–	0,911
S_3	1,133	1,097	–

Для формулировки решающих правил вводим систему следующих показателей: $H_{lj}^{\mu(1)}$ – количество элементов в l -м столбце оценочной матрицы C_{kl}^μ , значения которых больше единицы; $M_{lj}^{\mu(1)}$ – количество элементов в l -м столбце оценочной матрицы C_{kl}^μ , значения которых меньше единицы; $C_{kl,j,\max}^\mu$ – максимальное значение элемента в l -м столбце оценочной матрицы. Физический смысл показателей следующий: $H_{lj}^{\mu(1)}$ показывает, сколько вариантов из

рассматриваемого множества превышают l -й; $M_{l_j}^{\mu(1)}$ – в скольких вариантах доминирует l -я система; $C_{kl,jmax}^{\mu}$ определяет максимальную степень доминирования k -й системы над l -й (табл. 8).

Таблица 8

Матрица показателей доминирования

Варианты систем S_k	Варианты систем S_l		
	S_1	S_2	S_3
$H_{l_j}^{\mu(1)}$	2	1	0
$M_{l_j}^{\mu(1)}$	0		2
$C_{kl,jmax}^{\mu}$	1,133	1,097	0,911

В соответствии с [3, 4] поиск приоритетного распределения систем необходимо проводить только среди эффективных вариантов. Учитывая источники [13, 15], производим построение кортежа Парето: $P = \{S_3, S_2, S_1\}$.

Заключение

Найдено решение важной в прикладном смысле задачи определения отношений предпочтения на множестве альтернативных вариантов сложных систем на основе разнородных критериев оптимальности, заданных в частично формализованном и интервальном виде. Построение кортежа предпочтений сложных систем производится по векторному разнородному критерию оптимальности, и предлагаемый метод может найти широкое применение при решении прикладных задач принятия решений не только в технике, но и других сферах деятельности.

Библиографический список

1. Орловский, С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С. А. Орловский. – М.: Наука, 1981. – 203 с.
2. Гришко, А. К. Анализ применения методов и положений теории статистических решений и теории векторного синтеза для задач структурно-параметрической оптимизации / А. К. Гришко // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 26–34. DOI: 10.21685/2307-4205-2016-4-4.
3. Grishko, A. K. Multi-criteria Optimization of the Structure of Radio-electronic System in Indeterminate Conditions / A. K. Grishko, I. I. Kochegarov, N. V. Goryachev // XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). Russia, May 24–26, 2017. – Saint Petersburg, 2017. – P. 210–212. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970540.
4. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
5. Гришко, А. К. Динамический анализ и синтез оптимальной системы управления радиоэлектронными средствами / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 141–147.
6. Шарый, С. П. Конечномерный интервальный анализ / С. П. Шарый. – Новосибирск: Издат. XYZ, 2015. – 606 с.
7. Гришко, А. К. Выбор оптимальной стратегии управления надежностью и риском на этапах жизненного цикла сложной системы / А. К. Гришко // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 26–31. DOI: 10.21685/2307-4205-2017-2-4.
8. Grishko, A. K. Parameter control of radio-electronic systems based of analysis of information conflict / A. K. Grishko // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – Novosibirsk, Russia, 2016. – Vol. 02. – P. 107–111. DOI: 10.1109/APEIE.2016.7806423.
9. Grishko, A. Structural and Parameter Optimization of the System of Interconnected Processes of Building Complex Radio-Electronic Devices / A. Grishko, I. Kochegarov, N. Yurkov //

- 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), (Zakarpatty), Ukraine, February 21–25. – Polyana, Svalyava, 2017. – P. 192–194. DOI: 10.1109/CADSM.2017.7916112.
10. Гришко, А. К. Оптимальное управление параметрами системы радиоэлектронных средств на основе анализа динамики состояний в условиях конфликта / А. К. Гришко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 103–112. DOI: 10.21685/2072-3059-2016-2-9.
11. Гришко, А. К. Анализ надежности сложной системы на основе динамики вероятности отказов подсистем и девиации параметров / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2016. – № 6 (34). – С. 116–121.
12. Гришко, А. К. Алгоритм оптимального управления в сложных технических системах с учетом ограничений / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 1 (21). – С. 117–123.
13. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, S. Brostilov, N. Yurkov // XIIIth International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET). Lviv-Slavsko, Ukraine. – Lviv, 2016. – P. 214–218. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452017.
14. Гришко, А. К. Анализ надежности структурных элементов сложной системы с учетом интенсивности отказов и параметрической девиации / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 3 (19). – С. 130–137.
15. Grishko, A. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems / A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43842–43845.

Гришко Алексей Константинович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

Grishko Aleksey Konstantinovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кочегаров Игорь Иванович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alexey-grishko@rambler.ru

Kochegarov Igor' Ivanovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Лысенко Алексей Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysenko_av@bk.ru

Lysenko Aleksey Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 075.8: 007: 004.3: 518.81

Гришко, А. К.

Многокритериальный выбор оптимального варианта сложной технической системы на основе интервального анализа слабоструктурированной информации / А. К. Гришко, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 97–107. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-14.

В. А. Васильев, А. В. Самошин

ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОВРЕМЕННЫХ САЕ-ПРОГРАММ И ПРИБЛИЖЕННЫХ МЕТОДИК АППРОКСИМАЦИИ ДИАГРАММ « σ - ϵ » ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

V. A. Vasiliev, A. V. Samoshin

THE REVIEW OF MODERN CAE-PROGRAMS AND THE APPROACHED APPROXIMATION TECHNIQUES OF DIAGRAMS « σ - ϵ » FOR THE DECISION PROBLEMS OF ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Для решения задач пластического деформирования проведен анализ приближенных методик аппроксимации и построения диаграмм « σ - ϵ », использующих в качестве исходных данные ГОСТ и ТУ на материалы. Рассмотрены возможности современных САЕ-программ для решения данного типа задач. Целью работы является выбор оптимальных методик аппроксимации и построения диаграмм « σ - ϵ », позволяющих с высокой точностью определить напряженно-деформированное состояние упругих элементов и ответственных деталей датчиков с учетом пластических деформаций. **Материалы и методы.** Использовался метод конечных элементов, реализованный в программах Ansys и SolidWorks. **Результаты.** Примененные методики наглядно доказывают, что в случаях отсутствия экспериментальных данных испытаний образцов результаты расчетов являются весьма приближенными, но требуют минимума исходных данных. Наличие экспериментальных данных о механических характеристиках значительно увеличивает точность расчета, что позволяет с максимальной эффективностью использовать потенциал датчика. **Выводы.** Решение задач пластического деформирования актуально при проектировании изделий и, в частности, чувствительных элементов датчиков, изготавливаемых из металлов и сплавов. В этом случае даже приближенная оценка пластических деформаций обеспечивает возможность значительного улучшения массогабаритных показателей конструкции.

A b s t r a c t. Background. For the decision of problems of plastic deformation the analysis of the approached techniques of approximation and construction of diagrammes « $\sigma - \epsilon$ », using as initial given GOST and TU on materials is carried out Possibilities of modern CAE-programs to solve the given type of problems are considered. The purpose of work is the choice of optimum techniques of approximation and construction of diagrammes « $\sigma - \epsilon$ », allowing to define the intense-deformed condition of elastic elements and responsible details of sensors with high accuracy and taking into account plastic deformations. **Materials and methods.** As methods the method of final elements realised in programs Ansys and SolidWorks was used. **Results.** The applied techniques visually prove that in cases of absence of experimental data of tests of samples results of calculations are rather approached, but demand a minimum of the in-

initial data. Presence of experimental data about mechanical characteristics considerably increases accuracy of calculation that allows to use a sensor potential with maximum efficiency. **Conclusions.** The decision of problems of plasticity is actual in designing of products, and, in particular, sensitive elements of sensors made of metals and alloys. In this case even the approached estimation of plastic deformations provides possibility of considerable improvement mass and dimensional design indicators.

К л ю ч е в ы е с л о в а: САЕ-метод, метод конечных элементов, критерий фон Мизеса, упругость, пластичность, диаграммы « σ - ϵ ».

Key words: CAE-programs, finite elements method, criterion fon Mises, elasticity, plasticity, diagrammes « σ - ϵ ».

Как известно, для металлов до определенного момента соблюдается линейная связь между деформацией и напряжением [1]:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (1)$$

где ϵ – деформация; σ – напряжение; E – модуль упругости (константа материала).

Если напряжения, возникающие в конструкции под действием сил, превышают определенный порог, именуемый пределом пропорциональности, то зависимость (1) не соблюдается. При дальнейшем увеличении напряжения наступает область пластичности (при превышении предела текучести) – для пластичных металлов; и разрушение (при достижении предела прочности материала) – для хрупких материалов. В случае пластичного материала, если напряжения в конструкции превышают предел текучести, в конструкции возникают пластические деформации. При последующем уменьшении напряжения до нуля деталь (изделие) не возвращается в свое первоначальное положение.

Стремление к уменьшению веса и габаритов изделия приводит к необходимости увеличения напряжений в конструкции и максимально возможного использования прочностных возможностей материала, что приводит к образованию пластических деформаций. Для определения несущей способности, т.е. определения нагрузок, при которых происходит потеря работоспособности изделия, разработаны модели пластичности.

В настоящее время для решения широкого круга инженерных задач часто прибегают к использованию САЕ-программ, что позволяет упростить и сократить процесс расчета.

В САЕ-программах (на примере Ansys и SolidWorks) зачастую критерий текучести (момент наступления пластических деформаций) определяется критерием фон Мизеса [2, 3]. Данный критерий применяется для изотропных материалов, в частности металлов, у которых наблюдается вязкое разрушение.

Критерий фон Мизеса говорит о том, что текучесть возникает в том случае, когда энергия формоизменения в единице объема равна энергии формоизменения в том же объеме при достижении предела текучести в случае одноосного напряженного состояния. В соответствии с этой теорией скалярный инвариант (эквивалентное напряжение фон Мизеса) определяется выражением

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]},$$

где $\sigma_{\text{эКВ}}$ – эквивалентные напряжения фон Мизес; σ_1 ; σ_2 ; σ_3 – главные напряжения [1].

С учетом этого критерий текучести можно записать [2, 3]:

$$\sqrt{3}\sigma_{\text{эКВ}} - \sigma_t = 0,$$

где σ_t – предел текучести материала.

В графическом представлении (в пространстве главных напряжений) поверхность текучести фон Мизес является цилиндром с радиусом (R), равным пределу текучести материала

(рис. 1). Если напряженно-деформированное состояние попадает внутрь этого цилиндра, то пластичность не наблюдается. Появление пластичности происходит на границе цилиндра и за его пределами.

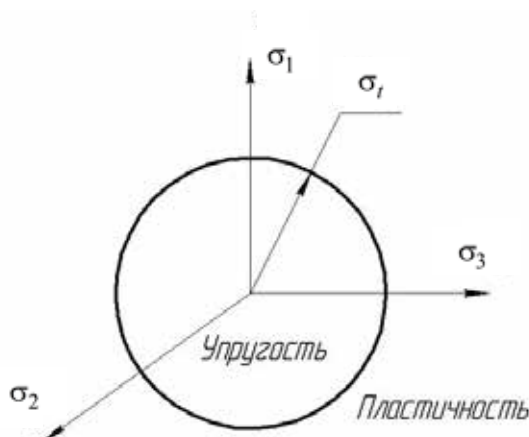


Рис. 1. Критерий фон Мизеса

Как говорилось ранее, при уменьшении напряжений до нуля (предварительная величина которых превышала предел текучести) конструкция или изделие меняет свои первоначальные размеры. При повторном нагружении соблюдается зависимость (1) до величины достигнутых ранее напряжений, т.е. произошло изменение поверхности текучести. Изменение поверхности текучести описывается законами упрочнения:

1) кинематическое упрочнение. Поверхность текучести остается постоянного размера и перемещается в направлении пластической деформации (рис. 2,а);

2) изотропное упрочнение. Поверхность текучести равномерно расширяется в направлениях пластической деформации (рис. 2,б).

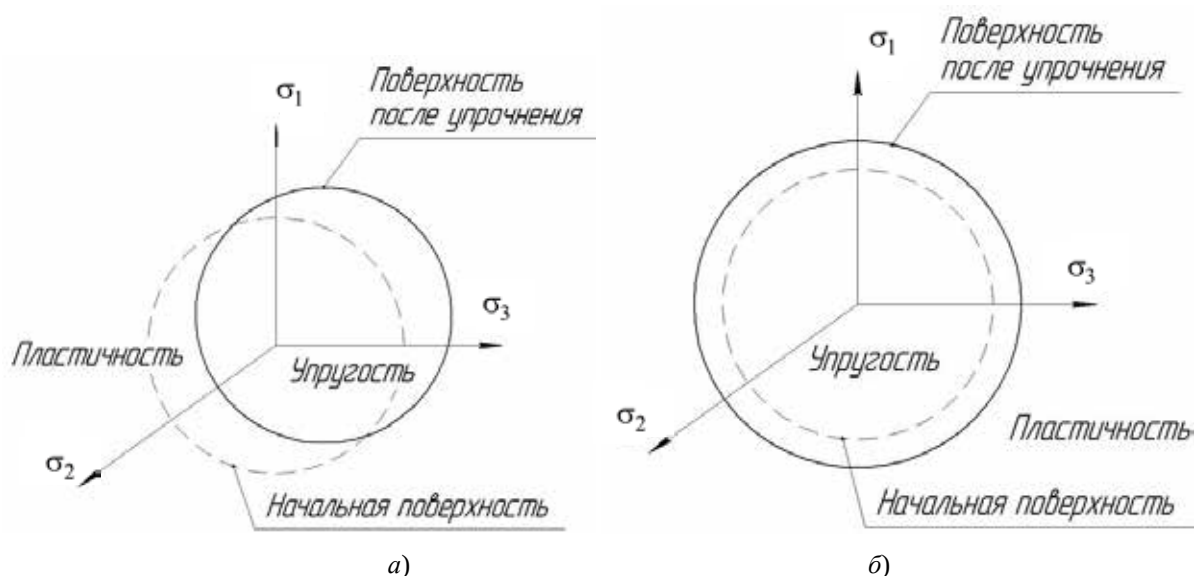


Рис. 2. Изменение поверхности текучести:

а – при кинематическом упрочнении; б – при изотропном упрочнении

В условиях малых пластических деформаций поведению большинства металлов в пластической области соответствует кинематическое упрочнение. В случае расчета больших деформаций из-за постоянства 2σ между пределами текучести при растяжении (σ_{t+}) и сжатии (σ_{t-}) кинематическая модель упрочнения может неадекватно описывать поведение материала, поскольку новое значение 2σ (между σ'_{t+} и σ'_{t-}) может находиться выше оси абсцисс (рис. 3).

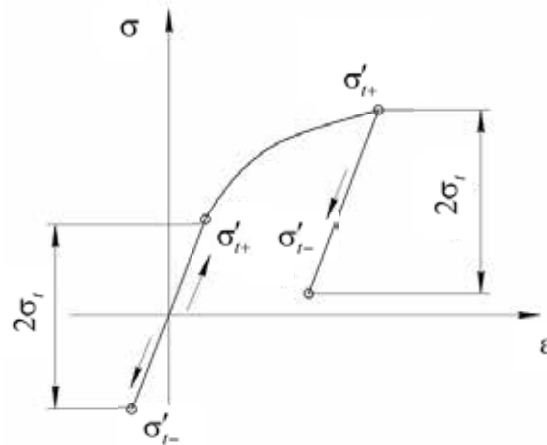


Рис. 3. Неадекватность модели кинематического упрочнения при больших деформациях

Для расчета в области пластических деформаций в качестве исходных данных используются результаты, полученные при испытаниях. Рассмотрим задание пластических свойств на примере данных, полученных после испытания на одноосное растяжение. Результаты испытаний перестраивают в координатах $\sigma(\epsilon)$. Следует отметить, что полученные в результате испытания напряжения и деформации являются условными, поскольку все они отнесены к первоначальным размерам испытуемого образца. Как только напряжения превышают предел текучести материала, происходит появление «шейки» (утонения заготовки в определенной области), в результате чего площадь поперечного сечения уменьшается. Если действующую в момент пластической деформации нагрузку отнести к фактической площади поперечного сечения, то мы получим экспериментальные значения напряжений, которые и используются в расчетах.

По полученным из эксперимента значениям условных напряжений и деформаций можно определить соответствующие им экспериментальные значения [4]:

$$\sigma_{\text{ист}} = \sigma_{\text{усл}} \left(1 + \epsilon_{\text{усл}} \right), \quad \epsilon_{\text{ист}} = \ln \left(\frac{l}{l_0} \right), \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{ист}}$ – экспериментальные напряжения; $\sigma_{\text{усл}}$ – условные напряжения; $\epsilon_{\text{ист}}$ – экспериментальные деформации; l_0 – первоначальная длина испытуемого образца; l – длина образца, соответствующая определенному напряжению.

На рис. 4 (линейный участок, на котором поведение материала подчиняется формуле (1), не показан) изображены экспериментальные (значения определены в соответствии с зависимостью 4), а также условные зависимости напряжения и деформации, полученные по результатам испытаний на одноосное растяжение сплава 12Х18Н10Т.

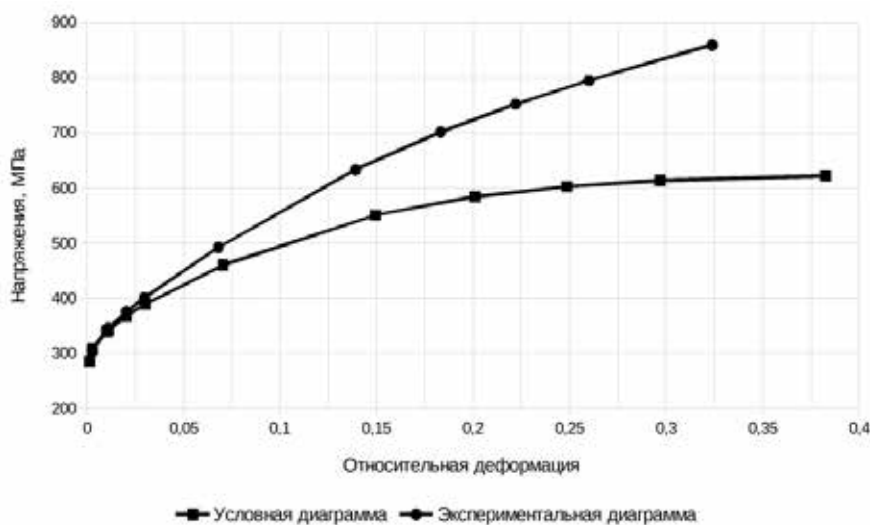


Рис. 4. Кривые напряжения деформации, полученные по результатам испытаний

Существуют два способа задачи пластических свойств в САЕ-программах (справедливо для Ansys, SolidWorks): полилинейной диаграммой и билинейной диаграммой.

В первом случае исходные данные задаются в табличной форме, в которую вводятся экспериментальные деформации и соответствующие им напряжения, определенные по формуле (1). Помимо этого, существуют методики построения диаграмм с использованием данных ГОСТ и ТУ [5, 6], позволяющие определять экспериментальные значения деформаций и соответствующие им значения напряжений.

Во втором случае пластические свойства задаются пределом текучести и касательным модулем упругости. Касательный модуль упругости численно равен тангенсу угла наклона касательной, проведенной из точки текучести в точку разрыва. В результате этого

$$E_k = \frac{\sigma_b \left(1 + \frac{\delta}{100}\right) - \sigma_t}{\ln \left(1 + \frac{\delta}{100}\right) - \varepsilon_t}, \quad (3)$$

где E_k – касательный модуль упругости; σ_b – временное сопротивление разрыву; δ – относительное удлинение; σ_t – предел текучести; ε_t – деформация, соответствующая пределу текучести (чаще всего 0,002). Данный случай является упрощенным, и для его использования достаточно данных, приведенных в ГОСТ и ТУ на материалы.

На рис. 5–7 приведены эпюры относительных и абсолютных деформаций, напряжений, полученных в результате эксперимента и в результате имитационного моделирования (ИМ). Расчетная модель, используемая в ходе ИМ, идентична детали, используемой в натурных испытаниях. В качестве исходных данных для имитационного моделирования использовались данные эксперимента. Свойства пластичности заданы с помощью:

- 1) билинейной диаграммы (касательный модуль упругости определен в соответствии с формулой (2));
- 2) полилинейной диаграммы (экспериментальные напряжения и соответствующие им деформации определены согласно зависимостям (1) по результатам эксперимента);
- 3) полилинейной диаграммы (экспериментальные напряжения и соответствующие им значения деформаций получены путем аппроксимации данных результатов испытаний: предел текучести (σ_t); предел прочности (σ_b); относительное удлинение (δ)) [6].

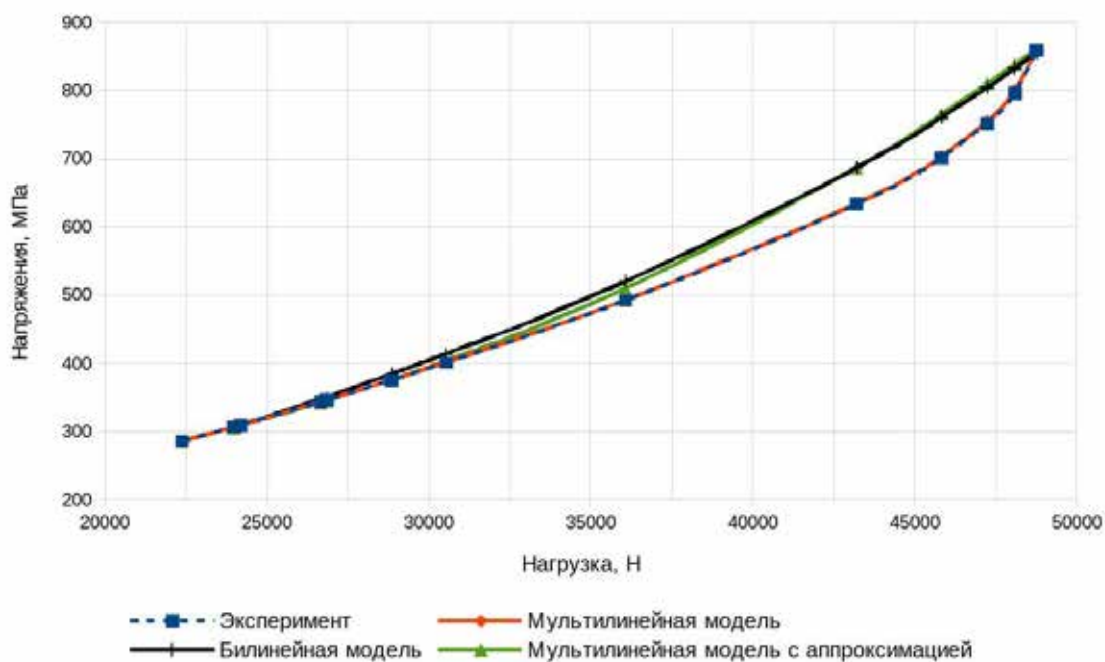


Рис. 5. Максимальные эквивалентные напряжения под действием нагрузки

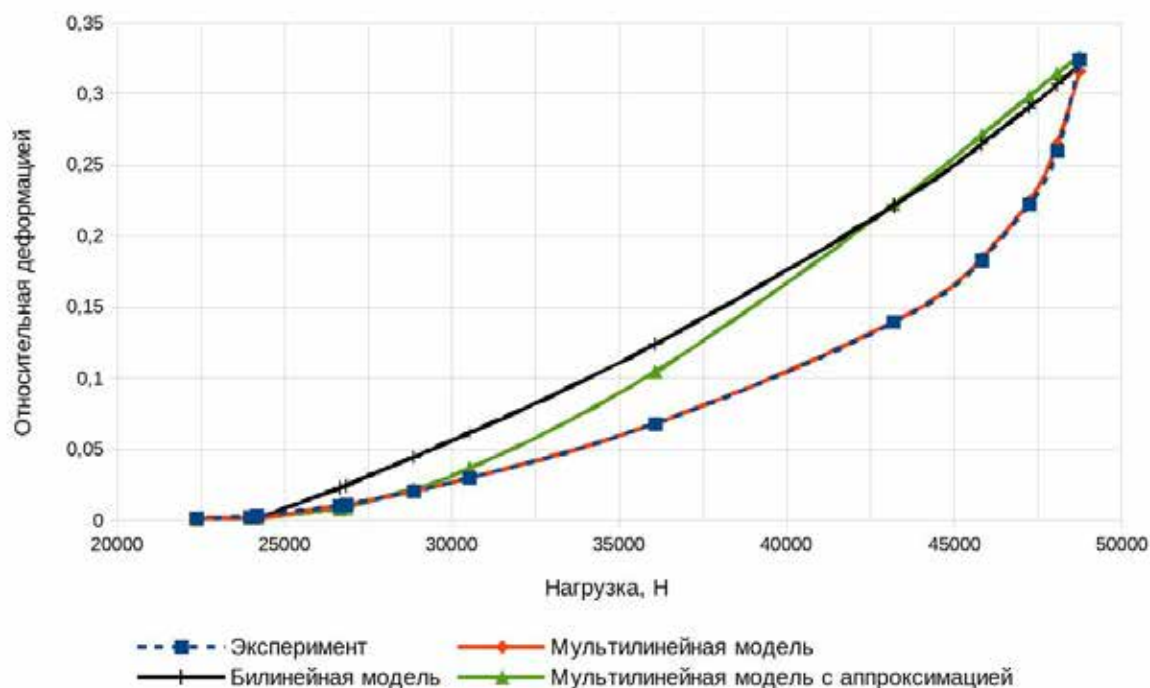


Рис. 6. Относительная деформация под действием нагрузки

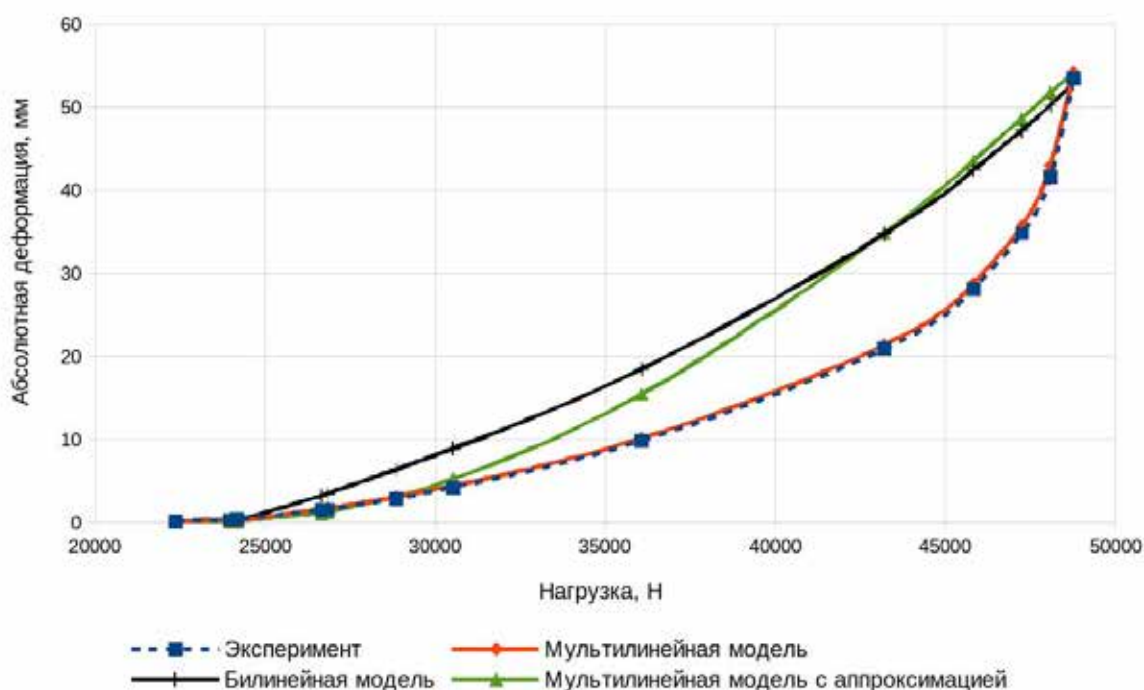


Рис. 7. Абсолютная деформация под действием нагрузки

Анализируя данные рис. 5–7, можно сделать вывод, что в случае, когда свойства пластичности задаются полилинейной диаграммой, исходными данными которой являются предварительные испытания образца на растяжение, погрешность моделирования составляет $\approx 2,4\%$. На стадиях, когда нагрузка мала, погрешность уменьшается и становится менее 1% .

При использовании полилинейной диаграммы, построенной по методике [6], исходными данными для которой являются предел текучести (σ_t), предел пропорциональности ($\sigma_{пл}$), предел прочности (σ_b) и относительное удлинение (δ), погрешность моделирования составила $\approx 60\%$. На начальных стадиях пластичности погрешность ИМ составляет $\approx 10\%$.

В случае, когда свойства пластичности заданы билинейной диаграммой, результаты имитационного моделирования отличаются от экспериментальных данных более чем в 2 раза.

Результаты ИМ свидетельствуют о возможности решения задач пластичности с высокой точностью в современных САЕ-пакетах. Минимальная погрешность наблюдается в случае использования данных, непосредственно полученных при испытаниях (например, испытание на одноосное растяжение).

При отсутствии данных натурных испытаний образцов для приближенных расчетов в области малых пластических деформаций возможно использование известных методик аппроксимирования [5, 6]. Для аппроксимации по данным методикам достаточно данных, содержащихся в ГОСТ и ТУ на материалы. Следует учесть, что точность аппроксимации будет зависеть от величины области пластичности (с ее увеличением точность увеличивается).

Решение задач пластичности актуально при проектировании изделий и, в частности, чувствительных элементов датчиков механических величин, изготавливаемых из металлов и сплавов. В этом случае даже приближенная оценка пластических деформаций обеспечивает возможность значительного улучшения массогабаритных показателей конструкции.

Библиографический список

1. Тимошенко, С. П. Сопротивление материалов / С. П. Тимошенко. – М. : Наука, 1965. – Т. 1. – 363 с.
2. Официальное справочное пособие ANSYS 14.5 Help.
3. Официальное справочное пособие SolidWorks Simulation 2012.
4. Биргер, И.А. Сопротивление материалов / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. – М. : Наука, 1986. – 560 с.
5. Мухатов, Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / Н. А. Мухатов. – М. : Машиностроение, 1981. – 266 с.
6. Метод построения диаграмм деформирования « σ - ϵ » по справочным механическим характеристикам материалов [Электронный ресурс] / О. С. Банкин, А. С. Дзюба, А. М. Хватан. – URL: http://cae-club.ru/sites/default/files/users/files/6/dzuba-havatan_0.pdf (дата обращения: 05.11.2014).

Васильев Валерий Анатольевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: opto@bk.ru

Vasil'ev Valeriy Anatol'evich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of instrument engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Самошин Алексей Владимирович

ведущий инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: alexsss13@gmail.com

Samoshin Alexey Vladimirovich

leading engineer designer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 539.3

Васильев, В. А.

Обзор возможностей современных САЕ-программ и приближенных методик аппроксимации диаграмм « σ - ϵ » для решения задач упруго-пластического деформирования / В. А. Васильев, А. В. Самошин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 108–114. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-15.

Д. В. Сердечный, Ю. Б. Томашевский

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЗАРЯДА МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

D. V. Serdechnyy, Yu. B. Tomashevskiy

THE CONTROL OF A MULTI-ELEMENT CHARGE LITHIUM-ION BATTERIES

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* В основе эффективной эксплуатации литий-ионного накопителя лежит непрерывный мониторинг состояния основных параметров аккумуляторных ячеек. Актуальной задачей является определение структуры системы управления накопителем энергии и разработка алгоритма заряда многоэлементной батареи, который позволит определить оптимальное соотношение времени работы накопителя и временных затрат на процесс зарядки и балансировки. *Материалы и методы.* Рассмотрен метод пассивной балансировки ячеек многоэлементного литий-ионного накопителя. Представлена структура системы управления при реализации пассивного метода балансировки для n последовательно соединенных ячеек. В качестве основных параметров зарядного и балансирующего процесса определены значение тока заряда, сопротивление балластного резистора и количество циклов балансировки. *Результаты.* По результатам эксперимента можно сделать вывод, что количество балансирующих циклов влияет на эксплуатационные характеристики литий-ионного накопителя. С увеличением числа балансирующих циклов m увеличивается уровень минимального напряжения среди всех ячеек и, следовательно, увеличивается время разряда многоэлементной батареи, но при этом увеличивается и время заряда накопителя. Для рассмотренной конфигурации батареи определено оптимальное число балансирующих циклов. *Выводы.* Разработан алгоритм заряда и балансировки батареи, обеспечивающий оптимальное соотношение величины разбаланса, потерь и времени заряда. Разработана методика выбора количества циклов балансировки многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареи, эффективность которой подтверждена экспериментально.

A b s t r a c t. *Background.* The operational efficiency of the lithium-ion battery is based on continuous monitoring of the state of its main parameters. The actual task is to determine the structure of the energy storage management system and develop a charging algorithm for a multi-cell battery that will allow determining the optimal ratio of the operating time and charge and balancing time. *Materials and methods.* The method of passive balancing of cells of a multi-element lithium-ion battery is considered. The structure of the control system for implementing a passive balancing method for series-connected cells is presented. As the main parameters of the charging and balancing process, the value of the charge current, the resistance of the ballast resistor and the number of balancing cycles are determined. *Results.* Based on the results of the experiment, it can be concluded that the number of balancing cycles affects the performance characteristics of the lithium-ion storage. With an increase in the number of balancing cycles, the minimum voltage level among all cells and the time of discharge of a multi-cell battery increase, but the charge time of the accumulator also increases. The optimum number of balancing cycles is determined for the battery configuration considered. *Conclusions.* The algo-

rithm of charging and balancing of the battery is developed, which provides the optimal ratio of unbalance, losses and charge time. A method for selecting the number of balancing cycles for a multi-element lithium-ion battery has been developed, the effectiveness of which has been confirmed experimentally.

К л ю ч е в ы е с л о в а: литий-ионный аккумулятор, накопитель, балансировка, емкость.

К e y w o r d s: lithium-ion battery, storage, balancing, and capacity.

Введение

Развитие электроэнергетических систем в последнее время характеризуется интенсивным ростом использования батарей на основе литий-ионных (литий-полимерных) аккумуляторов [1–4]. Этому в значительной степени способствует прогресс в таких областях, как возобновляемые источники энергии, сетевые технологии обработки данных и управление на базе технологий интеллектуальных сетей электроснабжения (*smart grid*) [1]. Аккумуляторная батарея (АБ) на основе литий-ионных аккумуляторов обладает оптимальным соотношением массо-габаритных характеристик и накопленной энергии и, как следствие, может использоваться не только в стационарных, но и мобильных системах различного назначения [5].

В основе безопасной и эффективной эксплуатации литий-ионных батарей лежит непрерывный контроль за основными параметрами аккумулятора, а также мониторинг истории заряда/разряда и фактической емкости.

При формировании многоэлементной последовательно соединенной литий-ионной аккумуляторной батареи (ЛИАБ) возникает проблема разброса напряжений и уровней заряда отдельных аккумуляторных ячеек («разбаланс ячеек»). По достижении хотя бы одной из ячеек критического напряжения при разряде необходимо отключить накопитель от нагрузки, так как дальнейший разряд повлечет нарушение требований эксплуатации. В этом случае емкость батареи будет определяться емкостью самой слабой ячейки.

Таким образом, чтобы повысить эксплуатационные характеристики аккумуляторных батарей, необходимо управлять зарядным процессом накопителя и балансировкой аккумуляторных ячеек [6–8].

Способы балансировки можно разделить на два типа: активная и пассивная балансировка [9–11]. Вид балансировки аккумуляторной батареи определяется техническими, эксплуатационными, экономическими требованиями, а также особенностями построения накопителя [12–16]. В работе [14] предложен способ балансировки литий-ионной батареи, который заключается в отводе избытков энергии с аккумуляторов, напряжение на которых превышает наименьшее из напряжений на всех ячейках батареи на определенную величину. Предложенный способ увеличивает время разряда многоэлементной батареи, однако он затронул с точки зрения продолжительности времени подготовки накопителя и технической сложности реализации. Предложенный в работе [15] способ подготовки литий-ионного накопителя эффективен для автономных систем, подзарядка которых производится в произвольный момент времени, и неприемлем для накопителей, время заряда которых определяется оператором. Способ, описанный в [16], применим в системах накопления энергии, однако неприемлем для накопителей энергии мобильных энергосистем и электротранспортных средств.

Таким образом, актуальной задачей является определение структуры системы управления накопителем энергии и разработка алгоритма заряда батареи, состоящей из n аккумуляторных ячеек, обеспечивающих оптимальное соотношение времени разряда накопителя и временных затрат на процесс зарядки и балансировки.

Структура системы управления многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареей и разработка алгоритма ее заряда

Рассмотрим пассивный метод балансировки, выбор которого определяется простотой реализации и эксплуатации, а также низкими затратами на производство в сравнении с системой активной балансировки. На рис. 1 представлена структура системы управления при реализации пассивного метода балансировки для n последовательно соединенных ячеек.

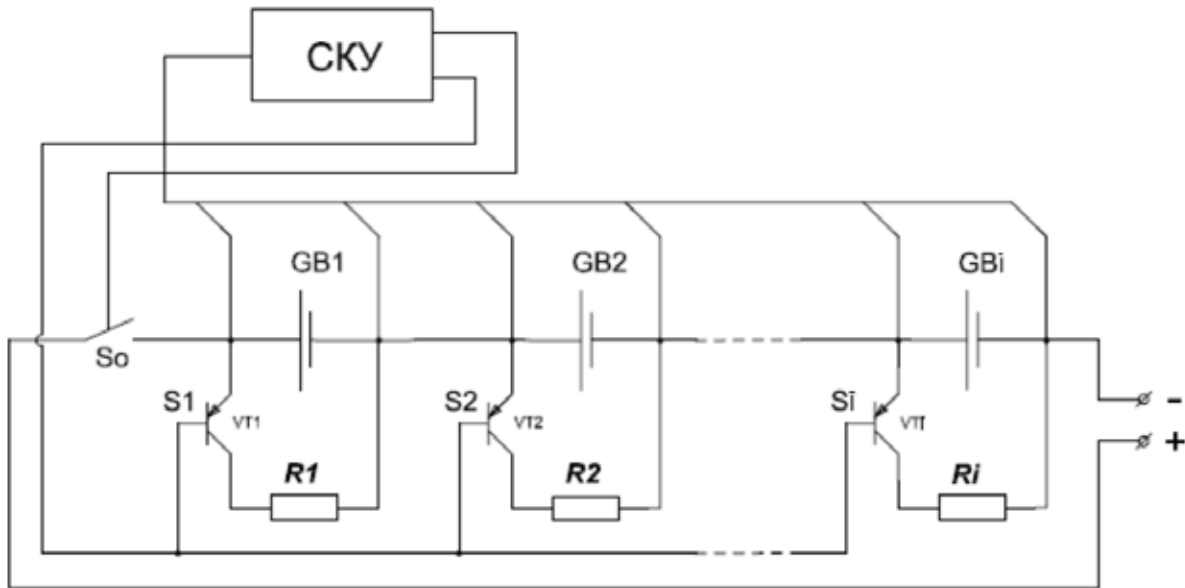


Рис. 1. Пример реализации пассивного способа балансировки

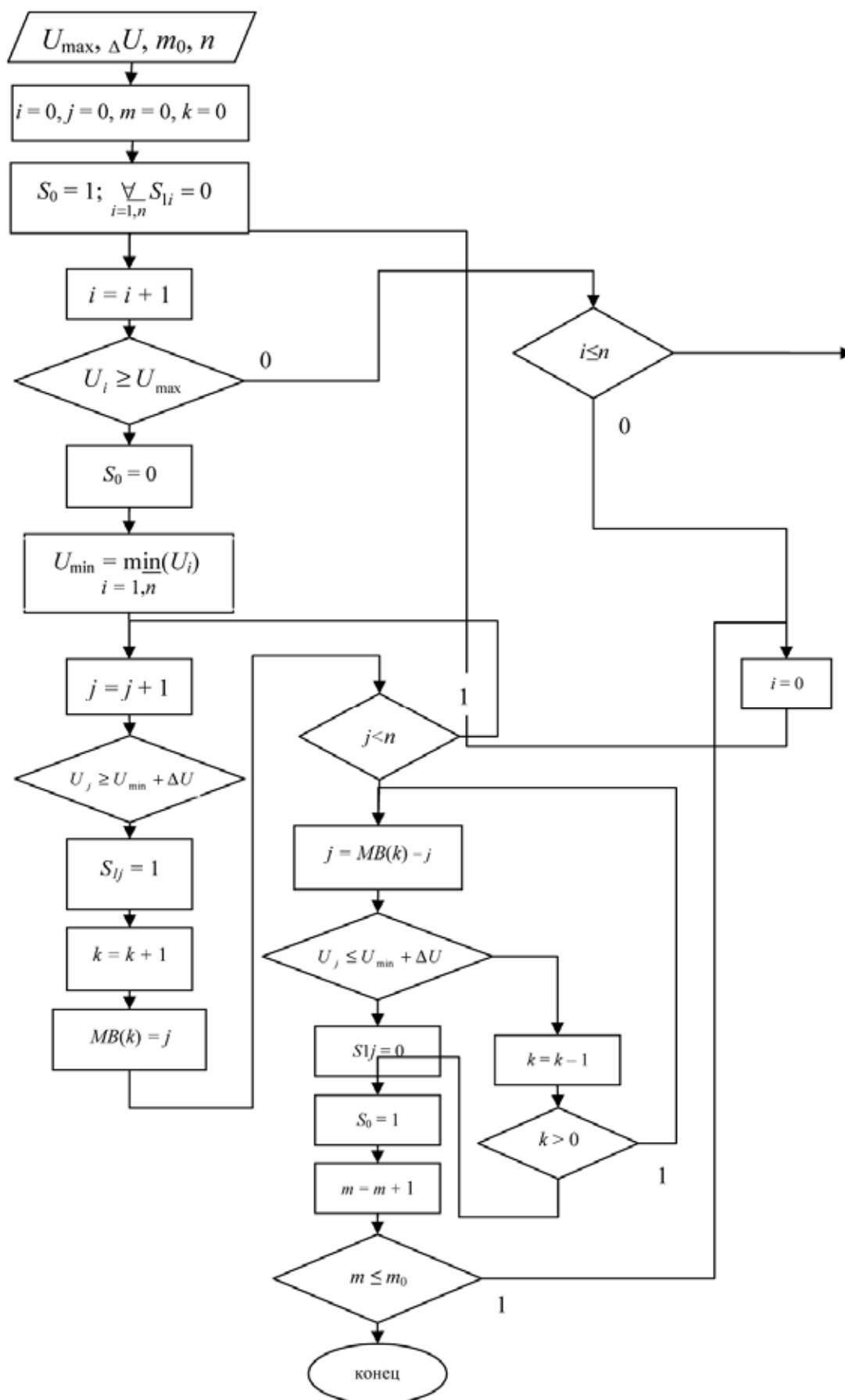
В процессе заряда последовательно соединенной аккумуляторной батареи система контроля и управления (СКУ) производит контроль уровней напряжений на аккумуляторных ячейках GB_i (вход СКУ). При достижении одной из ячеек критического уровня напряжения $U_{\max}$ происходит отключение ключа S_0 (выход СКУ) и наступает стадия балансировки: подключение балластных резисторов R_i к ячейкам GB_i посредством ключей S_i , в роли которых выступают транзисторы VT_i , управляющие сигналы поступают с выхода СКУ. Среди различных вариантов реализации СКУ на базе микроконтроллеров отечественных и зарубежных производителей, рассмотренных в [12–17], предпочтительной выглядит система управления с использованием микроконтроллеров Texas Instrument [18].

Блок-схема предлагаемого алгоритма заряда батареи, содержащей n литий-ионных аккумуляторов, показана на рис. 2 и состоит из следующих этапов:

1. Измеряются напряжения $U_i, i = \overline{1, n}$ на ячейках. Если $U_i \geq U_{\max}$, то размыкается ключ S_0 .
2. Формируется множество ячеек, для которых выполняется условие $U_i \geq (U_{\min} + \Delta U) \forall i, i = \overline{1, n}$, куда добавляется i -я ячейка из п. 1; ΔU – это величина уставки балансировки. Процессу балансировки подлежат ячейки с напряжением, превышающим минимальное из напряжений всех ячеек $U_{\min}$ на величину ΔU .
3. Для каждой ячейки сформированного множества замыкаются ключи S_i , обеспечивающие разряд соответствующей ячейки на балластный резистор R_i до уровня $U_i = \min_{i \neq j} \{U_j\} + \Delta U$.
4. Фиксируется завершение цикла балансировки. Осуществляется переход к процессу заряда: замыкание ключей S_0 и S_i . Количество циклов балансировки увеличивается на 1: $m = m + 1$.
5. Если $m \leq m_0 \forall i, i = \overline{1, n}$, то переход к пункту 1.
6. Окончание процесса заряда.

Определяющими параметрами процесса зарядки балансировочного процесса являются значение тока заряда (I_3), сопротивление балластного резистора R_i и количество циклов балансировки m . При $I_3 = \text{const}$ и $R_i = \text{const}$ параметром, определяющим продолжительность процесса зарядки, является количество циклов балансировки m .

Параметр m зависит от величины начального разбаланса между ячейками, который изменяется от цикла к циклу до заранее задаваемого значения δ .

Рис. 2. Блок-схема алгоритма заряда батареи, содержащей n литий-ионных аккумуляторов

Большое влияние на величину разбаланса оказывают внутренние характеристики аккумуляторной ячейки: фактическая емкость (Ач) и внутреннее сопротивление (Ом, для батарей из одной серии может варьироваться в интервале $\pm 0,005$ Ом). В процессе эксплуатации эти факторы оказывают существенный вклад в увеличение разбаланса и, как следствие, приводят к уменьшению емкости аккумуляторной батареи и соответственно к увеличению числа стадий балансировки [17]. Следует отметить, что процесс эксплуатации ЛИАБ без процедур балансировки, помимо увеличения разбаланса, сопровождается уменьшением емкости аккумуляторной батареи в целом [19].

Определение параметров балансировочного процесса

Рассмотрим процесс заряда многоэлементной ЛИАБ с использованием режима балансировки и дальнейшим разрядом. Пример соответствующих графиков изменения напряжений на ячейках трехэлементной батареи представлен на рис. 3.

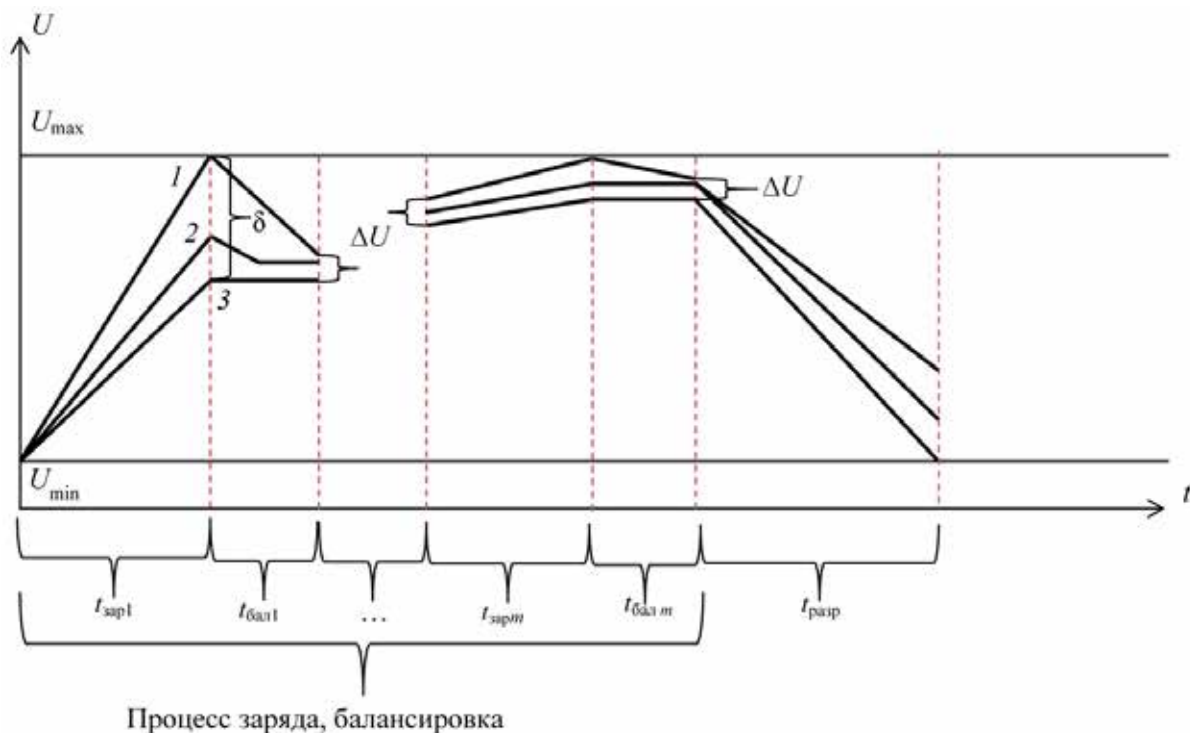


Рис. 3. Графики напряжения на трех последовательно соединенных ячейках в процесс заряда ЛИАБ с использованием режима балансировки и дальнейшим разрядом

На рис. 3: $U_{\max}$ — максимальное напряжение на ячейке; $U_{\min}$ — минимальное напряжение на ячейке; δ — заранее задаваемое значение разбаланса уровня напряжений на ячейках ЛИАБ; $t_{\text{зар}}$ — время заряда, $t_{\text{бал}}$ — время балансировки; ΔU — уставка балансирующей цепи.

С реализацией каждого последующего i -го цикла «заряд/балансировка» уменьшается время балансировки $t_{\text{бал}}$, а также происходит повышение уровня минимального напряжения $U_{\min}$ среди ячеек. Это благоприятно сказывается на состоянии общего уровня заряда многоэлементного литий-ионного накопителя и, как следствие, на такой важный эксплуатационный показатель как время разряда $t_{\text{разр}}$. Здесь ΔU задает диапазон «небалансированности» аккумуляторных ячеек.

Таким образом, балансировка обеспечивает стабильность времени разряда, улучшая эксплуатационные характеристики батареи, а ее отсутствие приводит к тенденции постепенного уменьшения емкости батареи. Важной задачей является определение числа m циклов «заряд/балансировка». Здесь обнаруживаются две противоположные тенденции: с одной стороны, как было уже отмечено, при увеличении m стабилизируется величина заряда накопителя, что очень важно для систем энергообеспечения автономных объектов, с другой, — увеличивается

общее время балансировки и соответственно время подготовки аккумуляторной батареи к работе, а также величина потерь мощности, определяемая балластными резисторами.

Очевидно, что $m = f(\Delta U, n)$, где n – количество ячеек в многоэлементной ЛИАБ. Определение области выбора количества m циклов балансировки многоэлементной батареи показано на рис. 4. При использовании в системах энергообеспечения автономных объектов накопителя конкретного типа в большинстве случаев известны предельные величины n_1 и n_2 ($n_1 > n > n_2$), а также ΔU_1 и ΔU_2 ($\Delta U_1 > \Delta U > \Delta U_2$). На рис. 4 показаны зависимости $\delta = f(m, n_1)$, $\delta = f(m, n_2)$, $t_{\text{разр}} = f(m, \Delta U_1)$ и $t_{\text{разр}} = f(m, \Delta U_2)$ для этих значений. Фиксируя точки пересечения соответствующих графиков $m_1 = f(\Delta U_2, n_2)$, $m_2 = f(\Delta U_2, n_1)$, $m_3 = f(\Delta U_1, n_1)$, $m_4 = f(\Delta U_1, n_2)$, определяем область (на рисунке заштрихована) выбора значения циклов балансировки многоэлементной батареи.

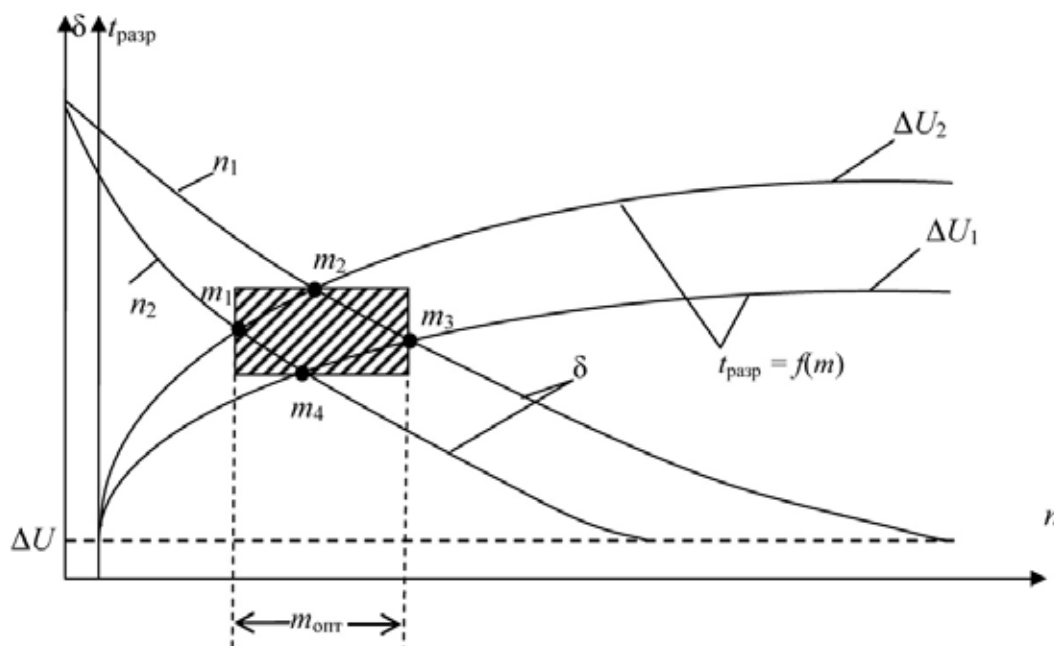


Рис. 4. Определение области выбора количества циклов балансировки многоэлементной литий-ионной батареи

Окончательный выбор значения из диапазона, обозначенного на рис. 4 как $m_{\text{опт}}$, осуществляется на базе задаваемых изготовителем величин параметров δ и $t_{\text{разр}}$, которые могут уточняться в процессе эксплуатации питаемого объекта. На основании последних значений определяется величина ΔU , и для конкретного количества n ячеек в батарее строятся соответствующие зависимости $\delta = f(m, n)$ и $t_{\text{разр}} = f(m, \Delta U)$, в области точки пересечения которых и будет находиться оптимальная величина m .

Следует отметить, что при решении ряда практических задач, когда на первый план выходят энергетические показатели, зависимость δ , определяемая как разность между U_{max} и U_{min} заряжаемых ячеек накопителя, может быть заменена на зависимость потерь электроэнергии от числа m балансирующих циклов. В этом случае $m_{\text{опт}}$ будет компромиссным решением между временем разряда и потерями, связанными с неэффективными циклами заряд/балансировка.

Эксперимент и обсуждение результатов

Представленная методика была применена для определения оптимального числа циклов «заряд/балансировка» для накопителя емкостью $C_{\text{ном}} = 2,5$ Ач на базе 10 соединенных последовательно ячеек INR18650.

Для трех накопителей из 10 последовательно соединенных аккумуляторных ячеек производилась процедура заряда током $I_3 = 1$ А. Для первого накопителя количество циклов балансировки $m_1 = 3$, для второго накопителя $m_2 = 5$, для третьего накопителя $m_3 = 10$. Время, за-

траченное на зарядный процесс для каждого накопителя: $t_{\text{зар}1} = 3,1$ ч; $t_{\text{зар}2} = 3,2$ ч; $t_{\text{зар}3} = 3,5$ ч. На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости напряжений при разряде током $I_{\text{разр}} = 2,5$ А для каждого из накопителей от уровня напряжения $U_{01} = 3,62$ В; $U_{02} = 3,71$ В; $U_{03} = 3,8$ В до $U_{\text{min}} = 2,5$ В.

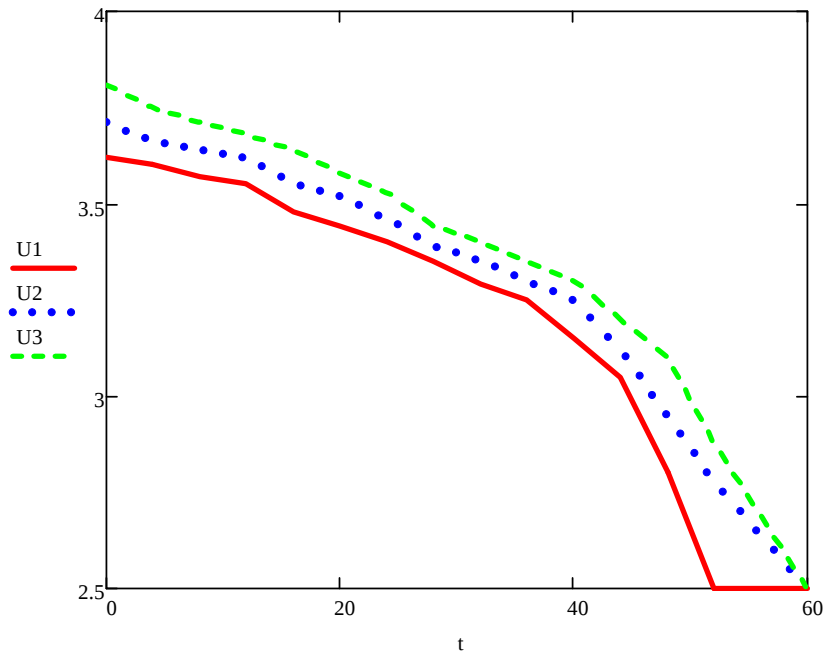


Рис. 5. Разряд многоэлементных батарей током $I_{\text{разр}} = 2,5$ А: U_1 — изменение напряжения от времени для накопителя с числом циклов балансировки $m = 3$, U_2 — при $n = 5$, U_3 — при $n = 10$. При этом время разряда для каждого из накопителей составило: $t_{\text{разр}1} = 0,85$ ч; $t_{\text{разр}2} = 0,96$ ч; $t_{\text{разр}3} = 1$ ч. Разрядная емкость каждого из накопителей соответственно: $C_{p1} = 2,12$ Ач, $C_{p2} = 2,4$ Ач, $C_{p3} = C_{\text{ном}} = 2,5$ Ач

По результатам эксперимента можно сделать вывод: количество балансировочных циклов оказывает влияние на эксплуатационные характеристики многоэлементной литий-ионной батареи. С увеличением числа балансировочных циклов m увеличивается уровень минимального напряжения среди всех ячеек и, следовательно, увеличивается время разряда многоэлементной батареи, но при этом увеличивается и время заряда накопителя. Для рассмотренной конфигурации батареи оптимальное число балансировочных циклов $m = 5$, так как при таком значении параметров было достигнуто оптимальное соотношение времени разряда и времени заряда накопителя $t_{\text{разр}2}/t_{\text{зар}2} = 0,3$ при $C_{p2} = 2,4$ Ач. Для накопителей 1 и 3: $t_{\text{разр}1}/t_{\text{зар}1} = 0,27$ при $C_{p1} = 2,12$ Ач и $t_{\text{разр}3}/t_{\text{зар}3} = 0,28$ при $C_{p3} = 2,5$ Ач.

Заключение

Разработан алгоритм заряда батареи, состоящей из n аккумуляторных ячеек с процессом балансировки, обеспечивающий оптимальное соотношение величины разбаланса, потерь и времени заряда.

Показано, что отсутствие балансировки литий-ионных аккумуляторных батарей, применяемых в системах энергообеспечения автономных объектов, приводит к тенденции постепенного уменьшения их емкости. Напротив, ее использование обеспечивает стабильность времени разряда, улучшая эксплуатационные характеристики батарей.

Разработана методика выбора количества циклов балансировки многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареи, основанная на поиске компромисса между увеличением максимального времени ее разряда, с одной стороны, и уменьшения размаха напряжений заряжаемых ячеек, с другой.

Осуществлена экспериментальная проверка предложенной методики, по результатам применения которой реализован эффективный балансировочный цикл для конкретного типа многоэлементной литий-ионной батареи.

Библиографический список

1. Global report on renewable energy sources international organization for the support of renewable energy REN21, 2016. – URL: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report>. (дата обращения: 02.04.2017).
2. Германович, В. Альтернативные источники энергии и энергосбережение / В. Германович, А. Турилин. – СПб. : Наука и Техника, 2014. – С. 8–10
3. Бурман, А. П. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем : учеб. пособие / А. П. Бурман, Ю. К. Розанов, Ю. Г. Шакарян. – М. : МЭИ, 2012. – 336 с.
4. Wikipedia the free encyclopedia. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_battery_types (дата обращения: 18.02.2017).
5. Смоленцев, Н. И. Накопители энергии в локальных электрических сетях / Н. И. Смоленцев // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4-2. – С. 176–181.
6. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery / Q. Wang, P. Ping, X. Zhao, C. Guanquan, J. Sun, C. Chen // Journal of Power Sources. – 2012. – Vol. 208. – P. 210–224.
7. Кедринский, И. А. Li-ионные аккумуляторы / И. А. Кедринский, В. Г. Яковлев. – Красноярск : Платина, 2002. – 268 с.
8. Багоцкий, В. С. Химические источники тока / В. С. Багоцкий, А. М. Скундин. – М. : Энергоиздат, 1981. – 360 с.
9. Pistoia, G. Li-Ion Batteries: Advances and Applications / G. Pistoia // Newnes. – Oxford, 2013. – 634 p.
10. Рыкованов, А. С. Активные и пассивные системы баланса Li-ion аккумуляторных батарей / А. С. Рыкованов, С. С. Беляев // Компоненты и технологии. – 2014. – № 3. – С. 121–124.
11. Moore, S. A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems / S. Moore, P. Schneider // Society of Automotive Engineers. – 2001. – № 1. – P. 9–13.
12. Бажинов, А. В. Система контроля заряда и разряда литий-ионных аккумуляторных батарей / А. В. Бажинов, В. Я. Двандненко, А. М. Дробинин // Вісник СевНТУ. – 2012. – № 134. – С. 52–55.
13. Иншаков, А. П. Проблема мониторинга и балансировки аккумуляторных батарей транспортных средств / А. П. Иншаков, Ю. Б. Федотов, С. С. Десяев, Д. В. Байков // Вестник мордовского университета. – 2016. – Т. 26, № 1. – С. 40–49.
14. Пат. № 2364992 Российская Федерация. Способ сбалансированной зарядки литий-ионной или литий-полимерной батареи / Роже Пелленк. – Заявл. 10.11.2006 ; опубл. 20.08.2009, Бюл. № 23.
15. Пат. № 2411618 Российская Федерация. Способ эксплуатации литий-ионной аккумуляторной батареи в автономной системе электропитания искусственного спутника земли / В. В. Коротких, С. Г. Кочура, М. В. Нестеришин. – Заявл. 30.11.2009 ; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 4.
16. Пат. № 2496189 Российская Федерация. Способ эксплуатации литий-ионной аккумуляторной батареи / В. В. Коротких, М. В. Нестеришин, С. И. Опенько. – Заявл. 10.11.2011 ; опубл. 20.10.2013, Бюл. № 29.
17. Сердечный, Д. В. Накопитель для сети Smart grid на базе литий-ионного аккумулятора / Д. В. Сердечный // ЛОМОНОСОВ-2015 : материалы Междунар. молодежного науч. форума / отв. ред. А. И. Андреев, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов. – М. : МАКС Пресс, 2015. – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM).
18. Battery Management Solutions Overview. – URL: <https://www.ti.com/lscs/ti/power-management/battery-management-products-overview.page>. (дата обращения: 02.05.2017).
19. Tarascon, J. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries / J. Tarascon, M. Armand // Nature. – 2001. – № 414. – P. 359–367.

Сердечный Денис Владимирович

аспирант,
кафедра системотехники,
Саратовский государственный технический
университет имени Ю. А. Гагарина
(Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)
E-mail: serdechnyy.denis@gmail.com

Serdechnyy Denis Vladimirovich

postgraduate student,
sub-department of system engineering,
Saratov State Technical University
named after Yu. A. Gagarin
(77 Politekhnikeskaya street, Saratov, Russia)

Томашевский Юрий Болеславович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой системотехники,
Саратовский государственный технический
университет имени Ю. А. Гагарина
(Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)
E-mail: yurytomash@mail.ru

Tomashevskiy Yuriy Boleslavovich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of system engineering,
Saratov State Technical University
named after Yu. A. Gagarin
(77 Politekhnicheskaya street, Saratov, Russia)

УДК 621.314

Сердечный, Д. В.

Управление процессом заряда многоэлементных литий-ионных аккумуляторных батарей /
Д. В. Сердечный, Ю. Б. Томашевский // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. –
№ 3 (21). – С. 115–123. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-16.

В. Г. Полосин

**ПОСТРОЕНИЕ ФАЗОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ В ПРОСТРАНСТВЕ
ЭНТРОПИЙНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК СЕРДЦА**

V. G. Polosin

**THE CONSTRUCTION OF PHASE TRAJECTORIES
IN THE SPACE OF THE ENTROPY-PARAMETRIC
POTENTIAL FOR THE STUDY OF THE DYNAMIC
CHARACTERISTICS OF THE HEART**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. В медицинских учреждениях наиболее доступные методы диагностики сердечно-сосудистых заболеваний основаны на электрокардиографических методах обследования. Предметом исследования являются фазовые траектории электрокардиосигнала, отображающие динамические свойства сердца в пространстве энтропийно-параметрического потенциала. Получение новых диагностических оценок на основе отображения скоростных параметров электрокардиосигнала, позволяющих обнаружить скрытые при традиционном анализе отклонения, является актуальной задачей здравоохранения. Цель работы состоит в исследовании новых способов анализа электрокардиосигнала (ЭКС) и выявлении диагностических признаков функционального состояния сердечно-сосудистой системы. **Материалы и методы.** В качестве метода исследования использован качественно новый информационно-вероятностный метод визуализации ЭКС, согласно которому применяются скоростные свойства изменения построения фазовых траекторий в пространстве операторов производных. Результаты получены на основе реальных экспериментальных данных электрокардиографических исследований. **Результаты.** В работе дана формула для аппроксимации сортированного ряда значений, построенная на основе центральных моментов распределений. Применение центральных моментов n -го порядка выборки ЭКС скользящего окна является эффективным инструментом для аппроксимации упорядоченной выборки значений ЭКС с помощью разложения по степенным составляющим s -го порядка. Фазовые траектории, построенные на основе операторов производных в энтропийно-параметрическом пространстве, обладают устойчивостью к влиянию внешних воздействий в сравнении с классическими методами оценки производных ЭКС и предоставляет дополнительные возможности для формирования диагностических признаков сигнала: выделение зубцов, определение моментов изменения кривой и ее производных, оценки асимметрии зубцов. Предложен критерий выделения зубцов ЭКС, построенный на основе среднего квадратического значения центральных моментов, приведенных к максимальным параметрам. Критерий позволяет проводить эффективную сегментацию эпох ЭКС в пространстве энтропийно-параметрического потенциала.

Abstract. Background. In medical institutions, the most accessible methods for diagnosing cardiovascular diseases are based on electrocardiographic methods of examination. The subject of the study is the phase trajectories of the electrocardiogram reflecting the dynamic properties of the heart in the space of the entropy-parametric potential. Reception of new diagnostic estimates by the image of velocity parameters of an electrocardiosignal is an *actual problem* of public health services. The aim of the work is to study new ways of analyzing the electrocardiogram and detect diagnostic signs of the functional state of the cardiovascular system. **Materials and methods.** The paper deals with a qualitatively new information-probabilistic approach of ECS processing and analysis, according to which the fast-changing properties of the construction of phase trajectories in the space of derivative operators are applied. As a research technique it is used qualitatively new information-likelihood method of visualisation ECS according to which velocity properties of change of build-up of phase trajectories in space of functionals of derivatives are used. Effects are gained on the basis of real experimental data of electrocardiographic examinations. **Results.** The paper gives a formula for approximating a sorted series of values, constructed on the basis of central moments of distributions. The application of the n -th order central moments of the ECS slide window selection is an effective tool for approximating an ordered sample of the ECS values by means of power series expansions of the s -th order. The phase trajectories constructed on the basis of the derivatives operators in the entropy-parametric space are resistant to the influence of external influences in comparison with the classical methods of evaluating the derivatives of the ECS and provides additional possibilities for the formation of diagnostic signs of the signal: the extraction of teeth, curve and its derivatives, evaluation of tooth asymmetry. A criterion for extracting the ECS teeth is proposed, constructed on the basis of the mean square value of the central moments, which are reduced to the maximum parameters. The criterion allows to conduct effective segmentation of the ECS epochs in the space of the entropy-parametric potential.

К л ю ч е в ы е с л о в а: энтропийно-параметрический потенциал, фазовая траектория, моменты третьего и четвертого порядка, зубцы электрокардиосигнала.

Key words: entropy-parametric potential, phase trajectories, moments of the third and fourth order, wave of the electrocardiosignal.

Введение

Заболевание сердечно-сосудистой системы (ССС) – одна из основных причин смертности взрослого населения в России. Важнейший этап диагностических исследований ССС связан с обработкой электрокардиосигнала (ЭКС), возможности которого позволяют выделить характерные признаки заболевания на ранних этапах его развития, что повышает эффективность лечения и, в ряде случаев, позволяет ограничиться своевременным применением профилактических процедур. В этой связи актуально совершенствование алгоритмов компьютерной обработки ЭКС для автоматического обнаружения заболевания и получения предварительного диагноза по результатам электрокардиографического (ЭКГ) обследования [1, 2].

Современные алгоритмы компьютерной обработки ЭКС направлены на повышение достоверности результатов диагностики состояния сердца. В связи с тем что ЭКС отражает эпохи развития событий при распространении потенциала действия по проводящей системе сердца и изменение во времени электрической активности сердца (ЭАС), в медицинской практике повсеместно распространен анализ ЭКС во временном и частотном пространстве [8–10]. Отображение ЭКС в фазовом пространстве потенциала отведения и скорости его изменения содержит дополнительную диагностическую информацию, ценность которой состоит в визуализации изменения последовательности пути и скорости распространения автоволновых процессов деполяризации и реполяризации миокарда при различных поражениях миокарда [5, 11, 12]. Компьютерная обработка в фазовом пространстве ЭКС *обеспечивает* обнаружение артефактов и экстрасистол по искажению ЭКС [4, 13], разделение траектории на циклы,

выделение траекторий для характерных эпох развития процессов в проводящей системе сердца [14], усреднение траектории в фазовом пространстве и оценки параметров траектории «эталонного» цикла [4]. Одновременное отображение амплитудных и скоростных параметров ЭКС позволяет обнаружить отклонения, скрытые от врача при традиционном анализе ЭКС в амплитудно-временном пространстве [4, 15].

Материалы и методы

Системы мониторинга функционального состояния ССС являются важнейшей составляющей частью алгоритмов клинических исследований при установлении диагноза заболевания. Повышение уровня развития современных диагностических систем за счет совершенствования технических средств аппаратной реализации делает возможным использование вероятностных подходов для анализа и контроля электрофизических параметров при построении систем мониторинга хаотической системы сердца в условиях свободной активности пациента.

В работе рассмотрен качественно новый информационно-вероятностный метод исследования ЭКС, основанный на визуализации ЭКС в пространстве энтропийно-параметрического потенциала, согласно которому используются фазовые траектории в пространстве операторов производных для оценки скоростных свойств изменения активности миокарда. Все результаты и графики, используемые при написании работы, получены на основе реальных экспериментальных данных электрокардиографических исследований.

Хаотические свойства динамической системы сердца

Сердце является основным элементом ССС, обеспечивающим непрерывность кровотока в организме человека на протяжении всей его жизни. Для непрерывной длительной работы ССС наиболее благоприятен хаотический режим, так как при работе объекта постоянно происходит перераспределение его внутренних ресурсов. Хаотические свойства динамической системы сердца обусловлены ее внутренней организацией и отражены в вероятностных изменениях свойств.

Определенная случайность внешних и внутренних процессов определяет случайный характер электрической активности сердца. При регистрации ЭКС случайными являются: цикл следования импульсов, амплитуда и продолжительность всех основных элементов ЭКС. В этих условиях наиболее достоверно описать реальные биологические объекты можно только с помощью вероятностных закономерностей. Системы, изменения которых носят случайный характер, принято называть стохастическими. Следует отметить, что хаотические системы легче адаптируются к изменениям условий внешней среды за счет оптимальной перестройки физиологических параметров [3].

Исследование энтропии термодинамических и информационных процессов сердца для физических процессов неинвазивной кардиодиагностики показывает тесную взаимосвязь этих процессов и, как следствие, из принципа минимизации продукции термодинамической энтропии вытекает принцип минимизации информационной энтропии биологической системы, оцениваемой в течение того же периода наблюдения [16].

Взаимосвязь активности сердца и продукции энтропии позволила установить временные интервалы и характерную функциональную форму процесса путем контроля неупорядоченности данных в пространстве энтропийно-параметрического потенциала.

Предлагаемая концепция мониторинга электрокардиосигнала направлена на непрерывный контроль статистических параметров распределения данных в скользящем окне одного кардиоцикла. Так как для стороннего наблюдателя попадание отсчетов в ограниченный интервал значений носит случайный характер, то для контроля изменения состояния сердечно-сосудистой системы достаточно установить характерную форму распределения отсчетов электрокардиосигнала в течение одного цикла. В связи с тем что изменение формы кривой распределения отражает возможный сбой сердечно-сосудистой системы, то отклонение параметров распределения от их стационарных значений указывает на возможность заболевания и необходимость обращения в медицинское учреждение.

Вероятностный подход к анализу неупорядоченности ЭКС

Анализ неупорядоченности значений выборки ЭКС с целью обнаружения временных интервалов QRS-комплекса, T-зубца, RR- и ST-интервалов проводится непосредственно по зарегистрированным выборочным данным, информация которых не искажена в результате предварительной обработки данных с целью подавления помех. Такой подход позволяет изменить структуру системы мониторинга, добавив качественно новые возможности как на этапе регистрации ЭКС, так и на этапе автоматического анализа с помощью дешифратора.

Недостаток современных исследований ЭКС состоит в том, что наличие зашумленности сигнала не позволяет исследовать производные второго и третьего порядка, обладающие важной диагностической информацией о скорости развития процессов и симметрии зубцов ЭКС. Фазовый портрет второго, третьего порядка содержит дополнительные диагностические признаки изменения ЭКС и используется для восстановления ЭКС на основе методов последовательного дифференцирования [6].

Построение аттрактора в пространстве центральных моментов распределений значительно расширяет возможности и повышает достоверность анализа ЭКС за счет возможности исследования производных n -го порядка.

В работе [17] показано, что для аппроксимации вероятностных распределений и выборок значений электрокардиоцикла можно использовать формулы рядов, построенных на основе центральных моментов распределений вида

$$u_i = \text{Me}(U) + \sigma(U) \frac{\tau_{1/2} - t_i}{\Delta\tau} \left(1 + \sum_{s=3}^n \left(\frac{\mu_s(U)}{(\mu_2(U))^s} \frac{(\tau_{1/2} - t_i)^{s-2}}{\Delta\tau^{s-2} (s-1)!} \right) \right), \quad (1)$$

где $\text{Me}(U)$, $\sigma(U)$ – медиана, среднее квадратическое отклонение выборки U случайных значений ЭКГ; $\tau_{1/2}$ – интервал времени, равный половине периода τ_n одного сердечного сокращения и рассчитанный как половина суммы всех характерных составляющих интервалов времени одного периода ЭКГ; $\Delta\tau$ – варьируемый интервал времени, найденный из соотношения.

Пример построения аппроксимаций известных статистических распределений, полученных с помощью ряда (1), показан на рис. 1 для нормального распределения (а) и распределения Вейбулла – Гнеденко (б).

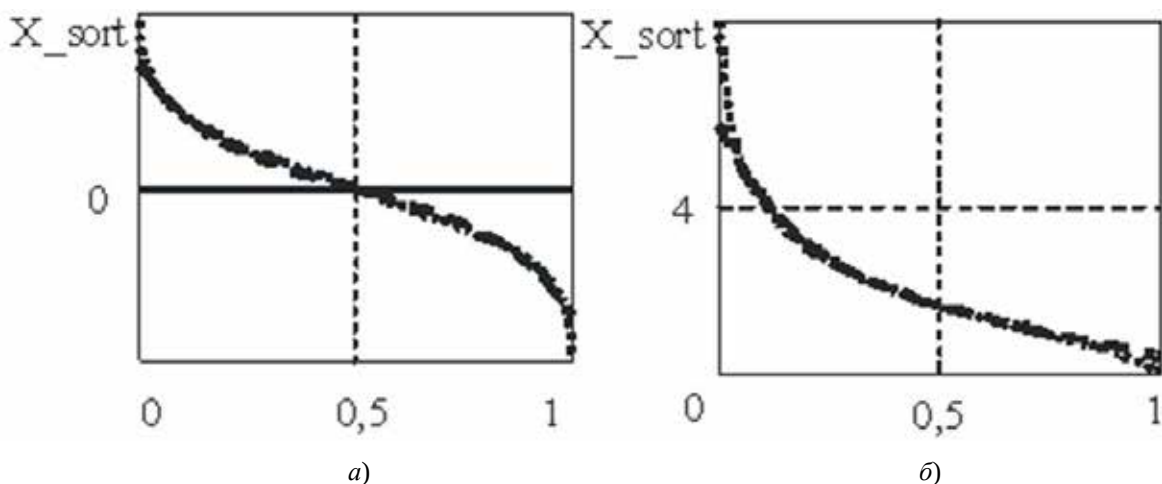


Рис. 1. Результаты аппроксимаций сортированных выборок

Из формулы ряда (1) следует, что моменты распределений и их отношения представляют собой операторы производных ЭКС во времени, сопоставляющих распределению значений выборки скользящего окна скоростные изменения сигнала. Погрешность аппроксимации в области 50 % относительно медианы не превышает 1–4 %.

Применение формулы (1) к аппроксимации ЭКС в скользящих окнах, ограниченных 20–30 значениями, представляет собой эффективный инструмент исследования изменений

ЭКС второго и третьего порядка, что невозможно достичь с помощью классических детерминированных алгоритмов из-за случайных изменений сигнала.

Анализ выборки скользящего окна

Методы анализа ЭКС в фазовом пространстве основаны на построении траекторий ЭКС в виде графической зависимости между ЭКС $u(t)$ и ее скоростью изменения во времени, рассчитанной по ее производной $du(t)/dt$. Применение центральных моментов n -го порядка выборки ЭКС скользящего окна является эффективным инструментом для аппроксимации упорядоченной выборки значений ЭКС с помощью разложения по степенным составляющим s -го порядка (1). Отношение среднего квадратического отклонения значений выборки $\sigma_i(U)$ к временному интервалу $\Delta\tau/2$, выделяемого скользящим окном, представляет собой оператор первой производной для ЭКС. Так как энтропийный потенциал пропорционален среднему квадратическому отклонению, то его свойства отражают скорость изменения ЭКС [18].

Формирование выборки значений в пространстве скользящего окна при обработке ЭКС и аппроксимация упорядоченной выборки скользящего окна приведены на рис. 2, где коэффициент аппроксимации задан как отношение энтропийно-параметрического потенциала к временному интервалу скользящего окна.

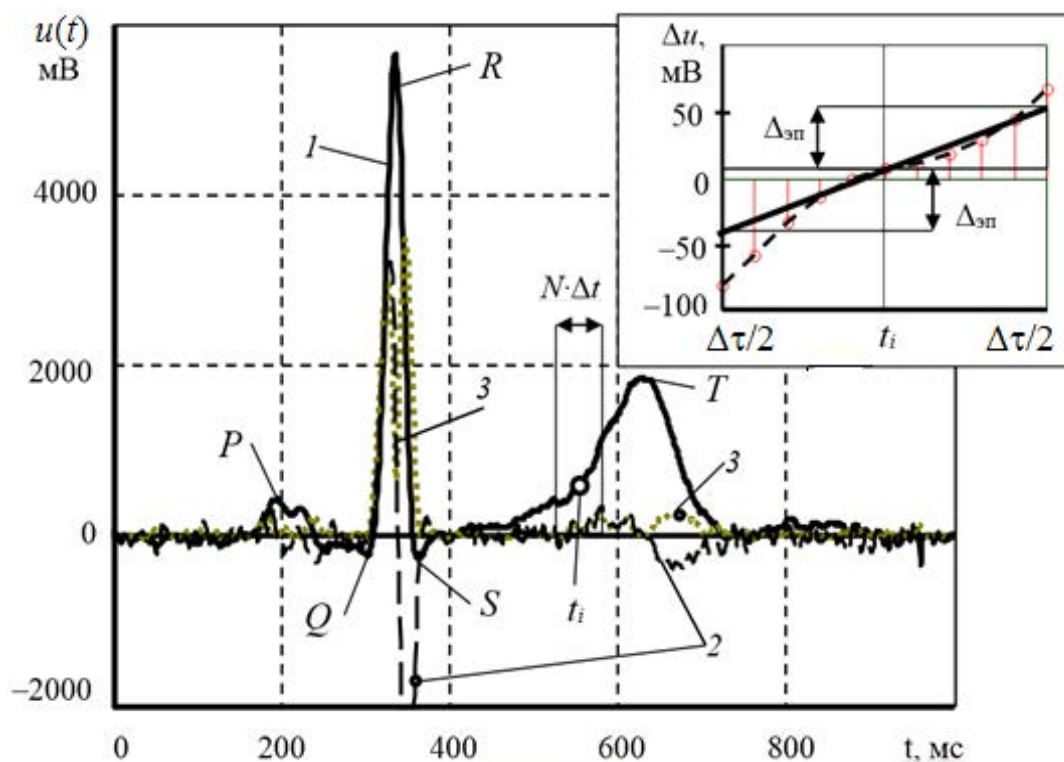


Рис. 2. Формирование скользящего окна при обработке ЭКС:
1 – ЭКС; 2 – зависимость от времени t_i отношения приращения значений ЭКС Δu к дискретности времени Δt (увеличение в 10 раз); 3 – зависимость от времени t_i энтропийно-параметрического потенциала $\Delta_{\text{эп}}$ (увеличение в 3 раза)

Применение в качестве оператора производной ЭКС отношения интервала неопределенности значений ЭКС к временному интервалу скользящего окна снижает воздействие помех и сохраняет форму ЭКС. На статистические параметры распределения выборки отсчетов, полученной в течение кардиосигнала, влияют состояния зубцов, комплексов и временных интервалов покоя кардиосигнала. Классически для контроля параметров формы распределений рассчитывают коэффициенты асимметрии и эксцесса. Статистические ряды, построенные на основе моментов высокого порядка, также позволяют получить хорошие аппроксимации для сортированной выборки данных [17].

Так как центральные моменты выборки данных в скользящем окне содержат информацию о состоянии элементов кардиоцикла, то построение фазовой траектории в энтропийно-параметрическом пространстве представляет независимую диагностическую информацию о состоянии сердечно-сосудистой системы. Таким образом, вычисление моментов распределения в скользящем окне ЭКС и построение фазовых траекторий в энтропийно-параметрическом пространстве – эффективный метод контроля состояния сердечно-сосудистой системы по форме распределения значений ЭКС.

Фазовые траектории в пространстве энтропийно-параметрического потенциала

Фазовые траектории, построенные с помощью статистических методов, обладают свойством стабильности, что проявляется в уменьшении влияния высокочастотного воздействия помехи [18]. Свойство стабильности проявляется в приближении статистической кривой к аттрактору кардиосигнала и сохранении формы фазовой траектории, для которой усиливается сглаживание при увеличении количества значений в выборке N группирования данных при условии сохранения формы кривой.

В работе [18] показаны исследования ЭКС в пространстве математического ожидания и оператора первой производной, в качестве которого использован энтропийно-параметрический потенциал (ЭПП). Для диагностики важное значение имеют траектории в пространстве производных третьего и четвертого порядка, построение которых обычными методами затруднено из-за наложения внешних помех и случайных изменений ЭКС. Качественно новый метод достигается при использовании операторов второго и третьего порядка и построения фазовых траекторий в пространстве центральных моментов, рассчитанных для значений ЭКС в скользящем окне. На рис. 3 показан пример построения фазовых траекторий R -зубца в пространстве момента третьего порядка и среднего квадратического отклонения. Отношение момента третьего порядка ко временному интервалу содержит свойства второй производной ЭКС. Среднее квадратическое отклонение (или ЭПП) характеризует производные первого порядка.

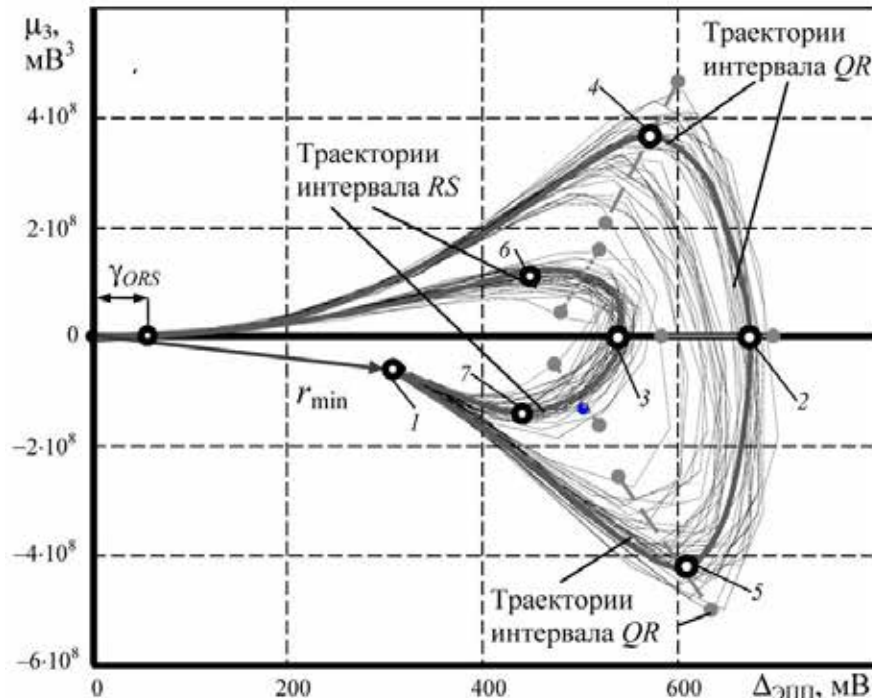


Рис. 3. Фазовые траектории QRS-комплекса в пространстве момента третьего порядка и ЭПП

Из рассмотрения рис. 3 можно видеть, что в фазовом пространстве хорошо определяется положение максимума R -зубца как минимум расстояния $r_{\min}$ от начала координат до точки 1 траекторий QRS-комплекса при $\mu_3 < 0$. Диагностическую значимость фазового портрета второго порядка имеют форма, площадь, плотность фазовых траекторий, значения энтропийно-

параметрического потенциала точек перегиба 2 и 3 для интервалов QR и RS комплекса QRS ; значения моментов третьего порядка в точках 4, 5, 6, 7 интервала QR и RS , характеризуют изменения знака первой производной ЭКС во временном интервале эпохи QRS -комплексов.

Важным параметром является пороговое значение для начала комплекса γ_{QRS} , позволяющее выделить эпохи развития QRS -комплексов, для которых суммарное значение суммы квадратов моментов и ЭПП намного больше, чем для других эпох ЭКС. Определение положения точек 1–7 является эффективным инструментом обнаружения, выделения и классификации для анализа QRS -комплекса. Эти точки содержат информацию об асимметрии и могут быть использованы для автоматизированного исключения артефактов.

После удаления значений эпох QRS -комплекса и приведения моментов к их максимальным значениям построение фазовых траекторий сигнала в пространстве моментов позволяет проводить анализ зубцов ЭКС. Фазовые траектории для T -зубца в пространстве моментов второго и третьего порядка также позволяют произвести выделение зубца, определить точки перегиба и положения максимума траектории по минимуму расстояния $r_{\min}$, оцениваемого в ЭПП.

На рис. 4 даны фазовые траектории в пространстве центральных моментов второго, третьего порядка (а) и моментов третьего, четвертого порядка (б). Для исследования использованы фазовые траектории, полученные с помощью центральных моментов третьего μ_{3j} и четвертого порядка μ_{4j} , принимаемые в качестве операторов второй и третьей производной.

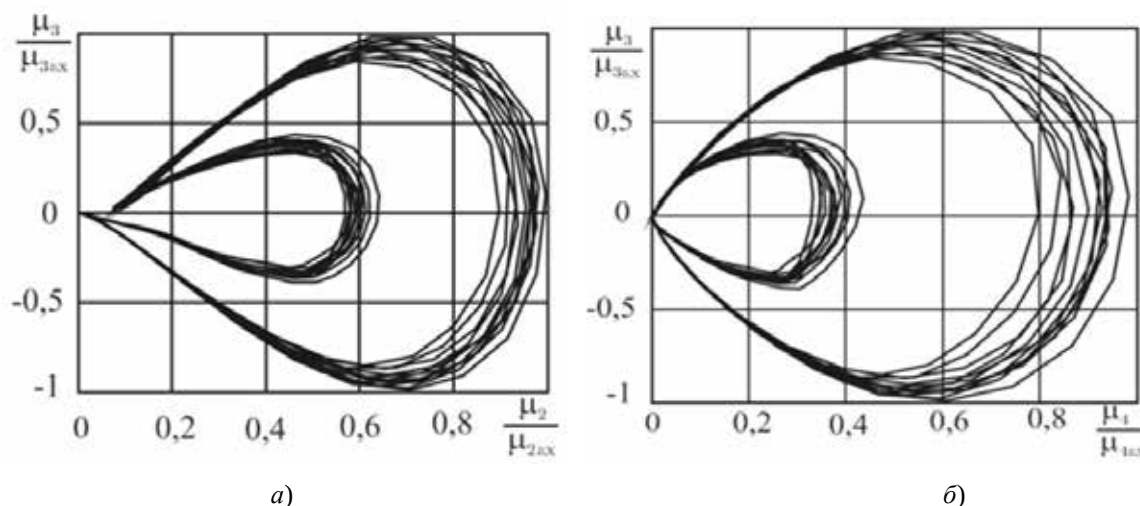


Рис. 4 Фазовые траектории T -зубца в приведенном пространстве энтропийно-параметрического потенциала при $m = 13$:

а – в пространстве моментов второго и третьего порядка;

б – в пространстве моментов третьего и четвертого порядка

Как можно видеть из иллюстраций, оценка скоростных изменений ЭКС в пространстве энтропийно-параметрического потенциала и центральных моментов распределений, рассчитанные по выборке значений ЭКС в скользящем окне, более устойчива к влиянию внешних воздействий в сравнении с использованием классических методов оценки производных ЭКС. Таким образом, построение фазовых траекторий ЭКС повышает разрешение кардиосигнала и представляет дополнительные характерные признаки состояния сердечно-сосудистой системы.

Построение аттрактора ЭКС представляет собой инструмент выделения временных эпох ЭКС. Для этого формируется обобщенный критерий в пространстве энтропийно-параметрического потенциала и моментов высокого порядка вида

$$\gamma_{QRS}^n \leq \sqrt{A \left(\frac{\Delta U_i}{\Delta U_{\max}} \right)^2 + B \left(\frac{\Delta_{\text{эп}i}}{\Delta_{\text{эп} \max}} \right)^2 + C \left(\frac{\mu_{3i}}{\mu_{3 \max}} \right)^2 + D \left(\frac{\mu_{4i}}{\mu_{4 \max}} \right)^2}, \quad (2)$$

где $\Delta U_{\max}$, $\Delta_{\text{эп} \max}$, $\mu_{3 \max}$, $\mu_{4 \max}$ – максимальные значения для всей выборки моментов.

Весовые коэффициенты A, B, C, D критерия – эффективный инструмент конструирования критерия, устойчивого к различным помехам. Совместное применение критериев увеличивает достоверное выделение элементов ЭКС и улучшает устранение артефактов, схожих с зубцами и комплексами ЭКС. Аппроксимация фазовой траектории повышает достоверность выделения временных интервалов комплекса QRS , P - и T -зубцов и делает выбор порогового значения не зависимым от воздействия помехи.

Аппроксимация аттрактора ЭКС с помощью эллиптической функции позволяет восстановить динамическую модель ЭКС по результатам исследования моментов ЭКС в энтропийно-параметрическом пространстве. Восстановленное значение u_i ЭКС в i -й момент времени t_i определяется по формуле

$$u_i = \sum_{j=i-S}^{i+S} \left(\Delta U_j + \sigma_j \frac{(i-j)}{2S} \left(1 + \frac{\mu_{3j}}{(\mu_{2j})^3} \frac{(i-j)}{4S} + \frac{\mu_{4j}}{(\mu_{2j})^4} \frac{(i-j)^2}{24S^2} \right) \right), \quad (3)$$

где S – целое, $S = [0,5m]$; m – число выборки значений в скользящем окне; $\Delta_{эп i}$, μ_{2j} , μ_{3j} , μ_{4j} – энтропийно-параметрический потенциал, центральные моменты второго, третьего и четвертого центральных моментов для выборок скользящего окна в i -й момент времени, найденные по аттракторам ЭКС.

Обсуждение результатов

Построение фазовых траекторий для ЭКС в энтропийно-параметрическом пространстве проводится непосредственно по результатам ЭКС, полученных с помощью регистратора, что позволяет исключить искажения, вносимые средствами предварительной обработки и фильтрации. При этом в пространстве ЭПП возможен анализ скоростных изменений ЭКС, соответствующих второй и третьей производным. Подобный анализ отсутствует в известных кардиодиагностических системах из-за большой случайной составляющей сигнала и широкой спектральной полосы внешних воздействий из-за того, что при получении второй и третьей производных от сигнала ЭКС на основе алгоритмических методов происходит усиление случайных составляющих. Построение фазовых траекторий ЭКС в пространстве энтропийно-параметрического потенциала позволяет усовершенствовать алгоритм сегментации ЭКС, найти новые диагностические характеристики для анализа и классификации зубцов ЭКС.

Таким образом, предлагаемый подход в неинвазивной кардиодиагностике, основанный на оценке информационных и вероятностных характеристик выборки сортированного ряда распределения результатов, полученных во время мониторинга, позволяет расширить функциональные возможности классического анализа ЭКС, не требуя при этом увеличения временных затрат или дополнительных материальных средств для усложнения оборудования.

Библиографический список

1. Русин, В. В. Неотложная помощь на догоспитальном этапе : руководство для врачей / В. В. Русин. – СПб. : ИнфоМед, 2010. – 207 с.
2. Вишневский, В. В. Влияние солнечной активности на морфологические параметры ЭКГ сердца здорового человека / В. В. Вишневский, М. В. Рагульская, Л. С. Файнзильберг // Биологические технологии и радиотехника. – 2003. – № 3. – С. 3–12.
3. Халфен, Э. Ш. Клиническое значение исследования скоростных показателей зубца ЭКГ / Э. Ш. Халфен, Л. С. Сулковская // Кардиология. – 1986. – № 6. – С. 60–62.
4. Файнзильберг, Л. С. Компьютерный анализ и интерпретация электрокардиограмм в фазовом пространстве / Л. С. Файнзильберг // SystemResearch & Information Technologies. – 2004. – № 1. – С. 32–46.
5. Волошина, О. А. Методы ЭКГ-диагностики функционального состояния человека на основе фрактального анализа и вейвлет-преобразования / О. А. Волошина, В. П. Олейник, С. Н. Кулиш, Сами Аль Отти // Радішудукторні компютерні системи. – 2010. – № 4 (45). – С. 30–34.
6. Нелинейные эффекты в хаотических системах / В. С. Анищенко, В. В. Астахов, Т. Е. Вадивасова, А. Б. Нейман, Г. М. Стрелкова, Л. Шиманский-Гайер. – М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. – 544 с.

7. Майоров, О. А. Повышение надежности исследования детерминированного хаоса в биологической активности (ЭЭГ, ЭКГ и вариабельности сердечного ритма) методами нелинейного анализа / О. А. Майоров, В. Н. Фенечко // Клиническая информатика и Телемедицина. – 2009. – Т. 5, вып. 6. – С. 10–17.
8. Рангайян, Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / Р. М. Рангайян. – М. : Физматлит, 2007. – 440 с.
9. Digital Signal Processing. C-Language Examples and Laboratory experiments for the IBM PC. ECG QRS Detection / ed. by Tomkins W. J. // ECG QRS Detection, 2000. – 450 с.
10. Бодин, О. Н. Помехоустойчивая обработка электрокардиосигналов в системах неинвазивной кардиодиагностики : монография / О. Н. Бодин, Л. Ю. Кривоногов, Е. А. Ломтев, К. А. Ожикенов. – Алматы : ЛЕМ, 2016. – 216 с.
11. Волкова, Э. Г. Диагностические возможности первой производной ЭКГ в оценке состояния коронарной артерии у больных ишемической болезнью сердца / Э. Г. Волкова, О. Ф. Калаев, А. Р. Ковынев // Терапевтический архив. – 1990. – № 3. – С. 35–38.
12. Фрумин, П. П. О фазовом портрете электрокардиограммы / П. П. Фрумин, М. Б. Штарк // Автометрия. – 1993. – № 2. – С. 51–54.
13. Коровин, Е. Н. Контурный анализ фазовых плоскостей квазипериодических биосигналов / Е. Н. Коровин, С. В. Филист, В. И. Серебровский, Л. В. Шульга // Медицинская техника. – 2013. – № 4. – С. 24–26.
14. Пат. 2410023 Российская Федерация. Способ выделения QRS-комплекса электрокардиосигнала / Кривоногов Л. Ю., Рахматуллов Ф. К., Логинов Д. С., Зайцева О. А. – Заявл. 29.04.2009 ; опубл. 27.01.2011, Бюл. № 3.
15. Roberts, F. M. Identification of ECG Arrhythmias using Phase Space Reconstruction / F. M. Roberts, R. J. Povinelli, K. M. Ropella // Proceedings of principles and practice of knowledge discovery in database (PKDD'01). – Freiburg, Germany, 2001. – P. 411–423.
16. Полосин, В. Г. Использование энтропии термодинамических и информационных процессов сердца в неинвазивной кардиодиагностике / В. Г. Полосин, О. Н. Бодин, Ф. К. Рахматуллов, С. А. Балахонова // Биотехносфера. – 2015. – № 3. – С. 7–12.
17. Полосин, В. Г. Способ статистического анализа электрокардиографической информации / В. Г. Полосин // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – № 10. – С. 120–126.
18. Полосин, В. Г. Статистические методы построения фазовой траектории электрокардиосигнала / В. Г. Полосин, О. Н. Бодин, С. А. Балахонова, Р. В. Рябчиков // Фундаментальные исследования. – 2014. – Ч. 12, № 9. – С. 2660–2665.

Полосин Виталий Германович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра физики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: polosin-vitalij@yandex.ru

Polosin Vitaly Germanovich

candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of physics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 539.3

Полосин, В. Г.

Построение фазовых траекторий в пространстве энтропийно-параметрического потенциала для исследования динамических характеристик сердца / В. Г. Полосин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 124–132. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-17.