

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Федорова Л. А., Фролов М. А., Андреев Н. В., Анохин В. В.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ
ПРЕОБРАЗОВАНИЙ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ
АППАРАТАМИ

5

Гришко А. К.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ
СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЕВИАЦИИ
ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ
В РАЗНОРОДНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ШКАЛАХ

11

Авсиевич В. В., Иващенко А. В.

РЕАЛИЗАЦИЯ ДРОБНОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА
В ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЕ
МУЛЬТИТОПЛИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО
СГОРАНИЯ АВТОНОМНОГО ЛОКОМОТИВА

21

Смыслов В. И., Бражников Ю. И., Филиппович П. А., Гурова С. А.

АНАЛИЗ И ВЫБОР ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
В СИСТЕМАХ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ
ДЛЯ ЖИДКОСТНЫХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

28

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Ишков А. С., Петров А. С., Солодимова Г. А., Егоров Д. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЕЗИСТОРОВ В УСЛОВИЯХ
ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

35

<i>Ревунов М. С., Салмов Е. Н.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОТОКА БУМАЖНОЙ МАССЫ НА СЕТКЕ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ	43
<i>Акчурин Р. Р., Трофимов А. А.</i> ВИХРЕВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ОБЪЕМНОГО И МАССОВОГО РАСХОДА ЖИДКОСТИ	51
<i>Ратушняк В. С.</i> РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЛЕД, НАМОРОЖЕННЫЙ НА ПРОВОД ЛЭП	59
ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ	
<i>Гулиева Д. А., Чапанов Н. С., Неврюзина Т. Б.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ	67
<i>Зинченко Т. О., Печерская Е. А., Кондрашин В. И., Спицына К. Ю., Фимин А. В., Мельников О. А.</i> АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛЕНОК ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ОКСИДОВ	73
<i>Голубков П. Е.</i> АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ ПРИ УПРАВЛЯЕМОМ СИНТЕЗЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ	81

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

- Fedorova L. A., Frolov M. A., Andreev N. V., Anokhin V. V.*
CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF ORGANIZATIONAL
TRANSFORMATIONS OF SPACECRAFT CONTROL 5
- Grishko A. K.*
SELECTION OF THE OPTIMAL DESIGN
OF THE RADIOELECTRONIC SYSTEM BASED ON THE INTERVAL
ANALYSIS OF THE DEVIATION OF DESIGN PARAMETERS
REPRESENTED IN DIFFERENT MEASURING SCALES 11
- Avsievich V. V., Ivaschenko A. V.*
FRACTIONAL PROPORTIONAL-INTEGRAL DIFFERENTIAL
CONTROLLER IMPLEMENTATION IN THE INFORMATION
AND CONTROL SYSTEM OF THE AUTONOMOUS
LOCOMOTIVE MULTIFUEL ENGINE 21
- Smyslov V. I., Brazhnikov Yu. I., Filippovich P. A., Gurova S. A.*
ANALYSIS AND SELECTION OF TEMPERATURE METERS
IN EMERGENCY PROTECTION SYSTEMS FOR LIQUID JET ENGINES 28

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

- Ishkov A. S., Petrov A. S., Solodimova G. A., Egorov D. V.*
THE RESEARCH OF THE RELIABILITY OF ELECTRONIC
PRODUCTS UNDER THE INFLUENCE OF IONIZING RADIATION 35
- Revunov M. S., Salmov E. N.*
SIMULATION OF THE SURFACE OF A PAPER FLOW 43
- Aktchurin R. R., Trofimov A. A.*
VORTEX MEASURER OF MASS AND VOLUMETRIC FLOW RATE 51

Ratushnyak V. S.
RESULTS OF AN EXPERIMENTAL STUDY
OF IMPACT ON ICE, FROZEN ON POWER LINES

59

TECHNOLOGY INSTRUMENTATION

Gulieva D. A., Chapanov N. S., Nevruzina T. B.
RESEARCH OF PROPERTIES OF HIGH-TEMPERATURE
ELECTRODES FOR PIEZOELEMENTS

67

**Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A., Kondrashin V. I.,
Spitsyna K. Yu., Fimin A. V., Mel'nikov O. A.**
ANALYSIS OF THE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS
OF TRANSPARENT FILMS CONDUCTIVE OXIDES

73

Golubkov P. E.
ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF THICKNESS
MEASUREMENT METHODS DIELECTRIC LAYERS
IN CONTROLLED SYNTHESIS PROTECTIVE COATINGS
BY MICRO-ARC METHOD OXYGENATING

81

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.78

DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-1

Л. А. Федорова, М. А. Фролов, Н. В. Андреев, В. В. Анохин

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

L. A. Fedorova, M. A. Frolov, N. V. Andreev, V. V. Anokhin

CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF ORGANIZATIONAL TRANSFORMATIONS OF SPACECRAFT CONTROL

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Представлены концептуальные основы и теоретические аспекты организационных преобразований в процессе развития наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами и измерений. Целью исследования является уменьшение расходов государства на управление космическими аппаратами (КА), а также повышение эффективности использования перспективных средств управления КА и повышение конкурентоспособности на отечественном и зарубежном рынках. **Материалы и методы.** Объектом исследования являются существующие и перспективные наземные комплексы управления автоматическими космическими аппаратами научного и социально-экономического назначения, наземные комплексы управления пилотируемыми космическими комплексами, наземные комплексы управления космическими аппаратами дальнего космоса, комплекс средств измерений, сбора и обработки информации. **Результаты.** Построение наземного автоматизированного комплекса управления космическим аппаратом на базе систем наземных и спутниковых каналов связи и космических систем ретрансляции позволяет повысить глобальность и оперативность информационного обмена (передачи командно-программной информации, приема целевой, служебной и телеметрической информации) с космическим аппаратом. **Выводы.** Необходимы концептуальные организационные преобразования наземного автоматизированного комплекса управления космическим аппаратом и измерений для внедрения новых технологий и совершенствования управления космическими аппаратами, которые позволят решить ряд важных задач, а именно: существенно снизить стоимость эксплуатации, уменьшить расходы государства на управление космическими аппаратами, повысить эффективность использования перспективных средств управления космическим аппаратом и иметь высокую конкурентоспособность на отечественном и зарубежном рынках.

A b s t r a c t. Background. This article contains the conceptual foundations and theoretical aspects of organizational transformations in the formation of the development process of a ground-based automated spacecraft control complex. The aim of the study is to determine pilot proposals for the invariant structure, technologies, technical appearance and characteristics of means and complexes for controlling spacecraft (SC) for various purposes, ensuring the implementation of various versions of federal targeted programs for the study and exploration of outer space. The object of research here is the composition of existing and promising means of

ground-based control systems for automatic spacecraft for scientific and socio-economic purposes, ground-based control systems for manned space systems, ground-based control systems for spacecraft far space, a complex of measuring instruments for collecting and processing information from cosmodromes. **Results.** The construction of a ground-based automated spacecraft control system based on ground-based and satellite communication channels and space relay systems allows increasing the globality and efficiency of information exchange (transmission of command and program information, reception of target, service and telemetry information) with the spacecraft. **Conclusions.** Conceptual organizational transformations of the ground-based automated spacecraft control and measurement complex are necessary for the introduction of new technologies and improvement of spacecraft control, which will allow solving a number of important tasks, namely: significantly reducing the cost of operation, reducing the state's expenses for managing space applications, increasing the efficiency of using advanced spacecraft control tools and having high competitiveness in the domestic and foreign markets.

К л ю ч е в ы е с л о в а: космический аппарат, ракета космического назначения, наземный автоматизированный комплекс управления, космический комплекс.

К e y w o r d s: spacecraft, space rocket, ground-based automated control system, space complex.

Наземный автоматизированный комплекс управления. Определение и функциональные задачи

Наземный автоматизированный комплекс управления космическим аппаратом и измерений (НАКУ КА) – это совокупность необходимой инфраструктуры, технических систем и средств, измерительных комплексов космодромов запуска (ИКК), предназначенных для формирования наземных комплексов, обеспечивающих реализацию автоматизированных процессов контроля состояния и параметров полета изделий ракетно-космической техники. НАКУ КА обеспечивает проведение измерений текущих навигационных параметров изделий ракетно-космической техники, обмен с КА и разгонными блоками командно-программной информацией, прием телеметрической и цифровой информации с изделий [1].

Целью развития НАКУ КА и измерений является надежное и экономичное решение задач управления автоматическими КА и пилотируемыми космическими комплексами и контроля их запусков. НАКУ КА и измерений предназначен для решения следующих задач:

- управление автоматическими КА;
- управление и информационное обеспечение транспортными пилотируемыми и грузовыми кораблями;
- информационно-телеметрическое и навигационно-баллистическое обеспечение пусков ракетно-космического назначения;
- обеспечение научных исследований, проводимых с применением наземного комплекса управления дальнего космоса и других средств;
- обеспечение взаимодействия технических средств и объектов НАКУ КА и измерений со средствами и организациями других ведомств и международных организаций, с секторами Главных конструкторов изделий ракетно-космической техники (РКТ), необходимого для выполнения целевых задач.

Проблемные вопросы управления космическими аппаратами

Одним из наиболее актуальных вопросов совершенствования процесса управления КА в настоящее время является разработка и применение новых технологических решений, так как использование существующей технологии управления КА сопровождается значительной нагрузкой средств НАКУ КА и измерений, а также высокими затратами на эксплуатацию средств управления КА.

Узким местом контура управления полетом КА является связь между наземным комплексом управления и бортовым комплексом управления. Основным недостатком существующих сетей приемо-передающих станций являются ограниченные зоны радиовидимости командно-измерительного пункта (КИП), что не позволяет обеспечить проведение сеансов связи с КА в любое требуемое время [2].

Таким образом, одним из центральных направлений совершенствования технологии управления КА, обеспечивающим повышение оперативности, глобальности и надежности управления КА, является использование спутников-ретрансляторов для передачи командно-программной, измерительной информации, обеспечение радио- и телевизионной связи. Эффективное и экономически выгодное применение космических систем ретрансляции будет возможным только при расширении количества ее абонентов и удовлетворении перспективных требований, предъявляемых к управлению КА и ретрансляции с КА информации целевого назначения [3].

Роль и место комплекса средств измерений, сбора и обработки ракеты космического назначения в НАКУ КА и измерений

Комплекс средств измерений, сбора и обработки ракеты космического назначения представляет собой оперативную совокупность взаимосвязанных технических средств с информационным и математическим обеспечением и сооружений из состава НАКУ КА и измерений, предназначенную для обеспечения контроля полета ракеты конкретного типа на участке выведения, обработки, документирования и распределения информации между потребителями.

При наличии в составе ракеты космического назначения разгонного блока для его информационно-телеметрического и навигационно-баллистического обеспечения используется наземный измерительный комплекс разгонного блока, который совместно с комплексом средств измерений, сбора и обработки обеспечивает решение задач информационно-телеметрического, навигационно-баллистического и командно-программного обеспечения на всем активном участке траектории выведения КА на заданную орбиту [4].

Комплекс средств измерений, сбора и обработки и наземный измерительный комплекс должны обеспечивать решение следующих основных задач:

- а) по информационно-телеметрическому обеспечению:
 - организацию и проведение телеизмерений на этапе предстартовой подготовки и на всех участках полета ракетно-космического назначения;
 - прием в зоне видимости наземных средств телеметрической информации в реальном масштабе времени, а также записанной в бортовые запоминающие устройства на участках отсутствия связи бортовой аппаратуры с наземными станциями;
 - сбор и передачу телеметрической информации;
 - определение факта отделения космической головной части;
 - оперативную обработку телеметрической информации для послеполетного анализа ограниченного числа параметров и выдачи заключения по пуску;
 - полную послеполетную обработку телеметрической информации для оценки результатов пуска в части функционирования всех агрегатов и систем и рассылку результатов обработки заинтересованным организациям;
- б) по навигационно-баллистическому обеспечению:
 - расчет и выдачу целеуказаний измерительным средствам комплекса средств измерений, сбора и обработки и наземного измерительного комплекса для проведения измерений на всех участках траектории выведения КА;
 - организацию и проведение измерений текущих навигационных параметров во время полета ракетно-космического назначения;
 - сбор и обработку измерений текущих навигационных параметров ракетно-космического назначения на активном участке траектории, участках доразгона, промежуточной и переходной орбитах;
 - определение параметров движения разгонного блока на активном участке траектории и участках доразгона по данным радиотехнических, оптико-электронных средств, а также навигационной аппаратуры потребителя ГЛОНАСС/GPS (передаются в составе телеметрической информации);
 - проведение полной послеполетной обработки измерений текущих навигационных параметров, полученных на активном участке траектории, с выпуском отчета по оценке точности работы системы управления ракетоносителем для оценки реальных летно-технических характеристик;
 - определение факта увода разгонного блока из зоны функционирования КА;
- в) по системе связи и системе единого времени:
 - обеспечение каналами связи и передачи данных всех абонентов комплекса средств измерений, сбора и обработки и наземного измерительного комплекса;
 - формирование и хранение шкалы времени и передача сигналов и эталонных частот на все измерительные средства для привязки результатов измерений;

– формирование сигнала подъема, регистрация и выдача точного времени старта на измерительные средства, в центры обработки и баллистические центры [5].

Для решения всех перечисленных задач необходимо создание комплекса средств измерений, сбора и обработки ракеты космического назначения и наземного измерительного комплекса разгонного блока как оперативных формирований, основными элементами которых в общем случае являются:

– региональный центр контроля, формируемый на космодроме запуска данного КА и предназначенный для централизованного решения задач по подготовке и управлению средствами ИКК и обеспечению контроля за полетом ракетносителя;

– центр анализа информации, предназначенный для централизованного автоматизированного решения задач по подготовке и обеспечению контроля за полетом ракетносителя, разгонного блока, а также для управления средствами комплекса средств измерений, сбора и обработки наземного измерительного комплекса;

– баллистические центры (основной и дублирующий).

Общим требованием к системе информационного обеспечению пусков изделий ракетно-космической техники является высокая надежность сбора, передачи, приема и обработки достоверной информации о работе систем, агрегатов и конструкции ракетно-космического назначения по всей трассе полета, точность и своевременность определения параметров движения при летных испытаниях и штатной эксплуатации [6].

Роль и место наземного комплекса управления разгонного блока в НАКУ КА и измерений

Съем телеметрической информации с разгонного блока требуется на всех активных участках траектории, в том числе проходящих вне зон радиовидимости наземных средств.

Траектории активных участков полета ракеты космического назначения проходят в основном на высотах полета до ~ 200 км. При выведении КА на геостационарную орбиту, высокие круговые и высокоэллиптические орбиты последний импульс включения двигательной установки разгонного блока проводится на высоте над поверхностью Земли – от 20 000 до 40 000 км.

Длительность сеансов передачи измерительной информации (телеметрической и траекторной) с ракетносителя – от 5 до 30 мин, а с разгонного блока на опорной, переходной и промежуточной орбитах – до нескольких часов (7–8 ч).

В перспективе должна быть обеспечена возможность контроля полета разгонного блока с использованием спутников-ретрансляторов [7].

Таким образом, основными направлениями развития информационно-телеметрического обеспечения запусков ракеты космического назначения являются:

1) внедрение унифицированных аппаратно-программных средств сбора и обработки телеметрической информации в центре анализа;

2) использование мобильных измерительных пунктов для контроля пусков ракет космического назначения по необорудованным трассам, а также в пристартовых районах космодромов;

3) создание и развертывание на объектах НАКУ КА и измерений перспективных комплексов телеметрических средств, включающих малогабаритные приемно-регистрирующие станции (радиотехнические комплексы), обеспечивающие прием телеметрической информации во всех применяемых стандартах и диапазонах (увеличенная скорость информационного обмена, надежность, помехоустойчивость, преддетекторная запись телеметрической информации, повышенный уровень автоматизации, автосопровождение, пространственный поиск изделий);

4) оптимизация состава и интегрирование комплекса телеметрических средств и средств обработки телеметрической информации.

Основными направлениями развития комплекса средств измерений, сбора и обработки информации с ракеты космического назначения и наземного измерительного комплекса разгонного блока являются:

1) широкое внедрение ретрансляционных радиоканалов для повышения надежности, непрерывности и глобальности контроля запусков изделий РКТ, позволяющих сократить необходимое количество объектов наземной космической инфраструктуры;

2) широкое внедрение автономных систем навигации на базе использования ГЛОНАСС/GPS с передачей навигационной информации в составе телеметрической информации в качестве основного средства навигационно-баллистического обеспечения;

3) использование командно-измерительных систем для измерения текущих навигационных параметров разгонного блока на высотах более 40 000 км;

4) использование оптико-электронных средств с улучшенными тактико-техническими характеристиками для видеоинформационного обеспечения запусков ракеты космического назначения;

5) создание средств приема и передачи видеоинформации с ракеты космического назначения.

Основными направлениями развития НКУ КА дальнего космоса являются:

1) создание унифицированного наземно-радиотехнического комплекса для контроля и управления всеми типами дальними космическими аппаратами (ДКА), запускаемых по различным программам исследований дальнего космоса, включая пилотируемые полеты;

2) создание антенных систем на базе многоантенных решеток большой эффективной площадью зеркала и развертывание Центров дальней космической связи (ЦДКС) для повышения надежности управления КА в дальнем космосе;

3) внедрение в запросной и ответной радиолиниях наземно-радиотехнического комплекса дальнего космоса Ка-диапазона частот с целью повышения энергетических характеристик для увеличения скорости передачи на ДКА командно-программной информации, приема дальними космическими аппаратами телеметрической, научной, телевизионной информации, повышения точности траекторных измерений;

4) увеличение пропускной способности по количеству одновременно обслуживаемых КА в соответствии с динамикой развития орбитальной группировки КА;

5) обеспечение проведения фундаментальных научных исследований в дальнем космосе с использованием перспективных средств НКУ ДКА.

Построение НАКУ КА на базе систем наземных и спутниковых каналов связи и космических систем ретрансляции позволяет повысить глобальность и оперативность информационного обмена (передачи командно-программной информации, приема целевой, служебной и телеметрической информации) с КА.

Заключение

Таким образом, необходимы концептуальные организационные преобразования НАКУ КА и измерений для внедрения новых технологий и совершенствования управления космическими аппаратами, которые позволят решить ряд важных задач, а именно: существенно снизить стоимость эксплуатации, уменьшить расходы государства на управление космическими аппаратами, повысить эффективность использования перспективных средств управления КА и иметь высокую конкурентоспособность на отечественном и зарубежном рынках.

Библиографический список

1. Черкесов, Г. Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем / Г. Н. Черкесов, И. Б. Шубинский. – Москва : Знание, 1987. – 116 с.
2. Альянах, И. Н. Моделирование вычислительных систем / И. Н. Альянах. – Ленинград : Машиностроение, 1988. – 224 с.
3. Цвиркун, А. Д. Синтез структуры сложных систем: оптимизационно-имитационный подход / А. Д. Цвиркун. – Москва : Наука, 1980. – 240 с.
4. Петушков, А. М. Исследование вопросов развития (прогнозирования) НКУ КА различных орбитальных группировок. Совершенствование научно-методического и математического обеспечения оценки (прогнозирования) достижимых характеристик средств НКУ КА различных орбитальных группировок : научно-технический отчет / А. М. Петушков, В. П. Иванов, М. К. Бондарева [и др.]. – Москва : ФГУП «РНИИ КП», 2002. – 76 с.
5. Петушков, А. М. Исследование вариантов развития наземного автоматизированного комплекса управления КА научного социально-экономического назначения и измерений : научно-технический отчет / А. М. Петушков, М. Ю. Кисляков, Н. С. Логачев [и др.]. – Москва : АО «Российские космические системы», 2010. – 164 с.
6. Лиманская, Т. В. Однопунктное управление группировкой малоразмерных КА / Т. В. Лиманская, А. С. Сергеев // Радиотехника, 2013. – № 1. – С. 78–82.
7. Фролов, М. А. Повышение метрологических характеристик информационно-измерительной управляющей системы двигательной установки / М. А. Фролов, О. А. Фролова, Р. Ш. Мусаев, А. В. Салмин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 47–51.

References

1. Cherkesov G. N., Shubinskiy I. B. *Metody i modeli otsenki zhivuchesti slozhnykh sistem* [Methods and models for assessing the survivability of complex systems]. Moscow: Znanie, 1987, 116 p. [In Russian]

2. Al'yanakh I. N. *Modelirovanie vychislitel'nykh sistem* [Computer system modeling]. Leningrad: Mashinostroenie, 1988, 224 p. [In Russian]
3. Tsvirkun A. D. *Sintez struktury slozhnykh sistem: optimizatsionno-imitatsionnyy podkhod* [Synthesis of the structure of complex systems: optimization and simulation approach]. Moscow: Nauka, 1980, 240 p. [In Russian]
4. Petushkov A. M., Ivanov V. P., Bondareva M. K. et al. *Issledovanie voprosov razvitiya (prognozirovaniya) NKU KA razlichnykh orbital'nykh gruppировок. Sovershenstvovanie nauchno-metodicheskogo i matematicheskogo obespecheniya otsenki (prognozirovaniya) dostizhimykh kharakteristik sredstv NKU KA razlichnykh orbital'nykh gruppировок: nauchno-tekhnicheskii otchet* [Research on the development (prediction) of the SPACECRAFT NCS of various orbital groupings. Improving the scientific-methodological and mathematical support for evaluating (predicting) achievable characteristics of SPACECRAFT NCS of various orbital groupings: scientific and technical report]. Moscow: FGUP «RNII KP», 2002, 76 p. [In Russian]
5. Petushkov A. M., Kislyakov M. Yu., Logachev N. S. et al. *Issledovanie variantov razvitiya nazemnogo avtomatizirovannogo kompleksa upravleniya KA nauchnogo sotsial'no-ekonomicheskogo naznacheniya i izmereniy: nauchno-tekhnicheskii otchet* [Research of options for the development of a ground-based automated control system for SPACECRAFT of scientific socio-economic purpose and measurements : scientific and technical report]. Moscow: AO «Rossiyskie kosmicheskie sistemy», 2010, 164 p. [In Russian]
6. Limanskaya T. V., Sergeev A. S. *Radiotekhnika* [Radiotechnics]. 2013, no. 1, pp. 78–82. [In Russian]
7. Frolov M. A., Frolova O. A., Musaev R. Sh., Salmin A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2016, no. 4 (18), pp. 47–51. [In Russian]

Федорова Лидия Анатольевна

доктор экономических наук, профессор,
кафедра прикладной экономики ЦУОП,
Российский университет дружбы народов
(Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6)
E-mail: Laf2006@yandex.ru

Fedorova Lidiya Anatol'evna

doctor of economical sciences, professor,
sub-department of applied economics TsUOP,
Peoples' Friendship University of Russia
(6 Miklukho-Maklaya street, Moscow, Russia)

Фролов Михаил Алексеевич

кандидат технических наук,
начальник центра создания средств, систем
и комплексов НАКУ КА, ИКК и КСИСО КРК,
АО «Российские космические системы»
(Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53, корп. 1)
E-mail: Frolov_MA@spacecorp.ru

Frolov Mikhail Alekseevich

candidate of technical sciences,
head of the center for the Creation of Means, Systems
and Complexes of NAKU KA, IKK and KSISO KRK
JSC Russian Space Systems
(bld. 1, 53 Aviamotornaya street, Moscow, Russia)

Андреев Николай Владимирович

начальник отдела организации проектирования,
испытаний применения и сопровождения
технических средств и систем ИКК и НАКУ КА,
АО «Российские космические системы»
(Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53, корп. 1)
E-mail: Andreev_NV@spacecorp.ru

Andreev Nikolay Vladimirovich

head of department of organization for design,
testing of application and maintenance of technical
means and systems of the IKK and NAKU KA,
JSC Russian Space Systems
(bld. 1, 53 Aviamotornaya street, Moscow, Russia)

Анохин Вячеслав Владимирович

ведущий специалист,
отдел организации проектирования,
испытаний применения и сопровождения
технических средств и систем
ИКК и НАКУ КА,
АО «Российские космические системы»
(Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, 53, корп. 1)
E-mail: Anohin_VV@spacecorp.ru

Anokhin Vyacheslav Vladimirovich

leading specialist,
department of organization for design,
testing of application and maintenance
of technical means and systems
of the IKK and NAKU KA,
JSC Russian Space Systems
(bld. 1, 53 Aviamotornaya street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Федорова, Л. А. Концептуальные основы организационных преобразований управления космическими аппаратами / Л. А. Федорова, М. А. Фролов, Н. В. Андреев, В. В. Анохин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 1 (31). – С. 5–10. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-1.

А. К. Гришко

**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ
НА ОСНОВЕ ИНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЕВИАЦИИ
ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ
В РАЗНОРОДНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ШКАЛАХ**

A. K. Grishko

**SELECTION OF THE OPTIMAL DESIGN
OF THE RADIOELECTRONIC SYSTEM
BASED ON THE INTERVAL ANALYSIS OF THE DEVIATION
OF DESIGN PARAMETERS REPRESENTED
IN DIFFERENT MEASURING SCALES**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассматривается методика многокритериального выбора предпочтительного варианта проектного решения на этапах тестирования опытных образцов радиоэлектронных систем, когда измеряемые и контролируемые проектные параметры отклоняются от значений технического задания и их оптимальные значения уточняются в процессе последующих этапов проектирования. В качестве объекта исследования рассматриваются радиоэлектронные системы, имеющие разнородные по природе параметры, представленные в виде интервальных значений. В качестве предмета исследования рассматривается оптимизационная модель для выбора опытного образца радиоэлектронной системы. Целью работы является разработка методики выбора оптимального проектного решения радиоэлектронной системы по совокупности разнородных параметров, представленных в виде девиационных диапазонов. **Материалы и методы.** Оптимальное проектное решение предлагается находить на основе комплексного применения методов интервального анализа, методов теории принятия решений, а также используя теорию нечетких множеств. **Результаты.** Разработана методика представления и обработки измерительной информации, основанная на введении интервального отношения предпочтения, которая учитывает девиацию проектных параметров опытных образцов радиоэлектронной системы и различного вида неопределенность, связанную с разнородностью параметров и шкал их измерения. Методика позволяет адекватно отражать и сравнивать разнородную измерительную информацию о качестве тестируемых опытных образцов радиоэлектронных систем и при этом обладает математической корректностью и приемлемой точностью. **Выводы.** Методика позволяет более обоснованно и с небольшими затратами получить решение задачи выбора оптимальной конструкции радиоэлектронных систем по результатам анализа измерительной информации, а также снизить количество повторных этапов проектирования, время и финансовые затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Методику предлагается использовать в системах поддержки принятия конструкторских решений на этапах тестирования опытных образцов радиоэлектронной техники.

Abstract. Background. The technique of multi-criteria selection of the preferred design solution is considered at the stages of testing prototypes of electronic systems, when the measured and controlled design parameters deviate from the values of the technical specifications and their optimal values are refined during the subsequent design stages. As an object of study, we consider electronic systems having heterogeneous in nature parameters, presented in the form of interval values. As a subject of research, an optimization model for selecting a prototype of an electronic system is considered. The aim of the work is to develop a methodology for choosing the optimal design solution for a radio-electronic system based on a set of heterogeneous parameters presented in the form of deviation ranges. **Materials and methods.** It is proposed to find the optimal design solution based on the integrated application of interval analysis methods, decision theory methods, and also using the theory of fuzzy sets. **Results.** A technique has been developed for the presentation and processing of measurement information, based on the introduction of an interval preference relationship that takes into account the deviation of the design parameters of the prototypes of the electronic system and various types of uncertainty associated with the heterogeneity of the parameters and scales of their measurement. The technique allows to adequately reflect and compare heterogeneous measuring information about the quality of the tested prototypes of electronic systems and at the same time has mathematical correctness and acceptable accuracy. **Conclusions.** The methodology allows more reasonably and at low cost to obtain a solution to the problem of choosing the optimal design of electronic systems according to the results of the analysis of measurement information, as well as reduce the number of repeated design stages, time and financial costs for research and development work. The methodology is proposed to be used in support systems for making design decisions at the stages of testing prototypes of electronic equipment.

К л ю ч е в ы е с л о в а: девиация, проектные параметры, оптимизация, критерий качества.

Key words: deviation, design parameters, optimization, quality criterion.

Введение

Радиоэлектронные системы (РЭС) имеют, как правило, сложную модульную архитектуру, различные условия эксплуатации и специфичные требования по надежности и эффективности применения. При разработке такой аппаратуры необходимо обеспечить очень большое количество проектных параметров и показателей качества, указанных в техническом задании заказчика. Проектирование таких систем является непростой задачей и регламентируется государственным стандартом, определяющим для этого несколько стадий научно-исследовательских (НИР) и опытно-конструкторских работ (ОКР). Пропуск любой из этих стадий проектирования увеличивает риски и смещает их на финальные этапы серийного производства. Отдельные стадии могут повторяться на итерационно, с переходом к самым первым этапам проектирования, что является нормальным при создании любого технически сложного и конкурентноспособного продукта, но и одновременно увеличивает финансовые и временные затраты на НИР и ОКР.

На этапе тестирования и/или опытной эксплуатации проектные параметры РС часто отклоняются от расчетных и проектировщики рассматривают несколько вариантов конструкций РС, из которых необходимо выбрать оптимальный и доработать его [1]. Практика показывает, что если не учитывать результаты предварительных испытаний или некорректно их анализировать, то последующие финансовые потери могут оказаться значительными. Широкая номенклатура отечественной и зарубежной элементной базы, разные эксплуатационные условия и специфические требования по надежности, а также большое количество типов конструкций усложняют выбор наилучшего проектного решения РЭС для требуемых условий эксплуатации.

Для модулей и компонентов РЭС, которые находятся в стадии разработки, большое количество параметров и показателей качества не имеет четких значений и уточняется в процессе последующих этапов проектирования. Разрабатываемые перспективные радиоэлектронные

системы и модули, функционирование которых, например, основано на новых физических принципах, вообще не имеют аналогов и проектных ограничений на реализацию. Конструкторам приходится учитывать такие показатели и характеристики уже на начальных стадиях проектирования РЭС в виде некоторых диапазонов их возможных изменений, и в таком виде они могут учитываться вплоть до запуска РЭС в серийное производство.

Существует особая группа критериев РЭС, которая имеет слабую формализацию. К таким, например, относятся качественные характеристики продукции: надежность, помехоустойчивость, электромагнитная совместимость, эффективность применения, дизайн, эргономичность, возможность модернизации и т.д. Для их формализации и приближенных решений применяют лингвистические переменные [2].

Но больше всего проектировщикам затрудняет выбор оптимальной конструкции РЭС одновременный учет множества параметров и их разнородность. Если эти критерии представлены в разнородных измерительных шкалах, то конструкторам трудно объективно сравнивать улучшение значения некоторого параметра с ухудшением другого. Именно без наличия условий сравнимости частных критериев невозможно построение принципа оптимальности и основанного на нем алгоритма решения многокритериальных задач. Решение задачи формирования и оптимизации структуры РЭС приходится искать в условиях многокритериальности и неопределенности измерительной информации.

Постановка задачи

Рассмотрим математическую постановку задачи выбора оптимального варианта конструкций радиоэлектронной системы по векторному разнородному критерию качества и частным критериям, представленным диапазонами их изменений. В процессе моделирования реальных систем могут быть такие ситуации, когда у проектировщиков нет четкого представления (информации) 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 $[0;1]$. Основная идея предлагаемой методики состоит в том, чтобы получить возможность сравнения разнородных интервальных критериальных значений путем построения интервальных отношений предпочтения. Для нахождения решений в задачах многокритериальной оптимизации предлагается использовать комплексное применение положений теории принятия решений, нечетких множеств и методов интервального анализа [1–4]. В конце 2008 г. на заседании рабочей группы по стандартизации интервальных вычислений IEEE P1788 в качестве основы для работы с интервальной документацией был принят международный стандарт (IEEE Interval Standard Working Group – P1788), положения которого также учтены в данной работе.

Для решения оптимизационной задачи необходимо произвести построение нечетких отношений предпочтения интервального вида (НОПИВ), а в качестве критериев использовать функции принадлежности, которые будут являться средством количественного сравнения разнородной измерительной информации о качестве проектируемой РЭС.

На основании работ [2–4] введем следующие обозначения: $S = \{S_\alpha, \alpha = \overline{1, n}\}$ – множество возможных альтернативных вариантов проектного решения РЭС; $K_i(S_\alpha) = [\underline{K}_i(S_\alpha); \overline{K}_i(S_\alpha)]$ – частные критерии оптимальности, заданные в интервальном виде, характеризующие каждый отдельный вариант проектного решения S_α , где $\underline{K}_i(S_\alpha)$ – нижняя граница интервала критериальной оценки, а $\overline{K}_i(S_\alpha)$ – верхняя граница интервала; $K(S_\alpha) = \{K_1(S_\alpha), K_2(S_\alpha), \dots, K_j(S_\alpha), \dots, K_r(S_\alpha)\}$ – векторный критерий, характеризующий каждый вариант проектного решения РЭС.

Требуется найти упорядоченное множество вариантов проектного решения радиоэлектронной системы (кортеж Парето) $P = (S_{k_1}^0, S_{k_2}^0, \dots, S_{k_p}^0)$, который ранжируется по отношению доминирования. Для элементов $S_{k_j}^0$ в соответствии со смыслом задачи выполняются условия:

$$K_i(S_{k_j}^0) = \min_{i=1, r; \alpha=1, n} [K_i(S_\alpha)], S_{k_j}^0 \in S^P \text{ или } K_i(S_{k_j}^0) = \max_{i=1, r; \alpha=1, n} [K_i(S_\alpha)], S_{k_j}^0 \in S^P.$$

Критерии качества, представленные в таком виде, рассматриваются как самостоятельные целостные объекты, между которыми в соответствии со смыслом задачи вводятся операции и отношения, использующие терминологию интервальных методов. Отклонения (девиации) проектных параметров и их интервальные величины таким образом полностью характеризуют параметры РЭС, поскольку задаются диапазонами изменения качества от лучшего значения до худшего, и все возможные значения, таким образом, также попадают в этот диапазон.

Математическим и вычислительным аспектам анализа статических систем в условиях неопределенности посвящена работа [4] и, используя этот источник, можно получить алгебраические решения уравнений с интервальными значениями.

Построение интервальных отношений предпочтения

В многокритериальных задачах оптимизации важно обеспечить требование одновременного и единообразного учета частных критериев, задаваемых как на количественном, так и на качественном уровне описания. Наиболее адекватным в таком случае является представление параметров и переменных модели оптимизации РЭС в виде некоторых связанных областей на измерительных шкалах, характеризующих возможные допустимые в конкретном случае значения каждого параметра. Исходная измерительная информация представляется в виде интервалов [4–6], при этом результаты моделирования также будут интервальными значениями, т.е. содержать интервальную неопределенность. Таким образом, анализируя множества упорядоченных пар S_k и S_l вариантов проектного решения системы $S = \{S_\alpha, \alpha = \overline{1, n}\}$ по аналогии с нечеткими отношениями предпочтения [7, 8], вводим нечеткие отношения 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 определим его интервальной функцией принадлежности $\mu^u K_i(S_k, S_l)$. Функции принадлежности определяем по формуле

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

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 шкалы интервальных оценок по i -му частному критерию оптимальности [2, 6–8]. Функция принадлежности также будет иметь интервальный вид: $\mu^u K_i(S_k, S_l) = [\mu^u K_i(S_k, S_l); \overline{\mu^u K_i(S_k, S_l)}]$ и характеризовать каждый вариант проектного решения РЭС S_α , где:

$\mu^u K_i(S_k, S_l) \in [-1; 0]$ – значение, характеризующее максимальную степень потерь при признании проектного решения РЭС S_k , доминирующей проектному решению РЭС 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 проектного решения РЭС S_k , доминирующей проектному решению РЭС S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i ;

$\mu^u K_i(S_k, S_l) \in [-1; 0]$ – значение, характеризующее абсолютное отсутствие доминирования проектного решения РЭС S_k над проектным решением РЭС S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i ;

$\overline{\mu^u K_i(S_k, S_l)} \in [0; 1]$ – значение, характеризующее абсолютное доминирование проектного решения РЭС S_k над проектным решением РЭС S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i ;

$[\mu^u K_i(S_k, S_l); \overline{\mu^u K_i(S_k, S_l)}] \in [-1; 1]$ – интервальное значение, характеризующее степень выигрыша и степень потерь при признании проектного решения РЭС S_k , доминирующей над проектным решением РЭС S_l по скалярному интервальному критерию оптимальности K_i .

Отношение строгого интервального предпочтения проектного решения РЭС S_k над проектным решением РЭС S_l будет определяться его функцией принадлежности $\mu_D^u K_i(S_k, S_l)$, которая характеризует интенсивность доминирования проектного решения РЭС S_k над проектным решением РЭС S_l по i -му частному интервальному критерию оптимальности в виде

$$\mu_D^u K_i(S_k, S_l) = \mu^u K_i(S_k, S_l) - \mu^u K_i(S_l, S_k).$$

Отношение интервального недоминирования проектного решения РЭС S_k над проектным решением РЭС S_l будет определяться его функцией принадлежности $\mu_{ND} K_i(S_k, S_l)$ как дополнение к $\mu_D^u K_i(S_k, S_l)$ в виде

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

Степень недоминируемости проектного решения РЭС S_k ни одним другим проектным решением РЭС по i -му скалярному интервальному критерию оптимальности будет характеризоваться [9, 10] функцией принадлежности множеству недоминируемых систем $\mu_D^* K_i(S_k)$ в виде

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

Таким образом, значение функции принадлежности $\mu_D^* K_i(S_k)$ показывает степень близости варианта проектного решения по рассматриваемому i -му частному интервальному критерию оптимальности.

Пример выбора оптимального проектного решения радиоэлектронной системы

Радиоэлектронные комплексы относятся к классу сложных технических систем и их проектирование является непростой задачей. На финальных стадиях проектирования часто бывает так, что большое количество задаваемых критериев и проектных параметров имеют отклонения и могут быть представлены в виде диапазонов их возможных изменений. Это может быть диапазон рабочих частот, полоса пропускания, дальность действия, масса, стоимость, габариты и др. Параметры, определяющие надежность, помехоустойчивость, эффективность применения, также могут быть представлены с помощью некоторых субъективных характеристик в интервальной форме.

Рассмотрим пример выбора предпочтительного проектного решения радиоэлектронной системы из трех возможных вариантов, которые характеризуются четырьмя критериями качества, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Критерии оценивания и результаты испытаний образцов РЭС

Частные критерии	Варианты проектного решения РЭС			
	S_1	S_2	S_3	m_i
$K_1(S_\alpha)$ – энергопотребление (Вт/ч)	[550; 650]	[550; 700]	[550; 600]	1000
$K_2(S_\alpha)$ – надежность, наработка на отказ (тыс. ч)	[45; 75]	[70; 80]	[50; 80]	100
$K_3(S_\alpha)$ – дальность действия (обнаружения) (км)	[5; 7]	[4; 6]	[6; 8]	10
$K_4(S_\alpha)$ – масса (кг)	[6; 8]	[7; 9]	[4; 6]	10

Практика показывает, что девиация (отклонение значений) параметров тестируемой РЭС наблюдается в сторону их ухудшения относительно заданных техническим заданием, но на испытаниях расчетные значения контролируемых параметров чаще всего находятся в пределах, определенных проектным заданием, а, значит, оптимальное значение параметра будет находиться в границах интервала его изменений. Эксперты-конструкторы в процессе испытания образцов РЭС могут вместо их некоторой интегральной оценки предложить некоторые диапазоны, в пределах которых находятся все их индивидуальные оценки каждого образца РЭС, что будет гарантировать большую объективность тестирования.

Критерии (контролируемые параметры) представлены в виде интервалов, необходимо выбрать вариант радиоэлектронной системы, удовлетворяющий следующим условиям:

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

$$K_2(S_\alpha^*) = \max_{\alpha=1,3} [K_2(S_\alpha)], \quad (2)$$

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

$$K_4(S_\alpha^*) = \min_{\alpha=1,3} [K_4(S_\alpha)]. \quad (4)$$

Таким образом, различные по своей природе критерии имеют и разнородные единицы измерения (Вт/ч, ч, км, кг), разные шкалы измерений m_i и диапазоны отклонения качества. Принятие решения осложняется тем, что критерии не являются аддитивными, и реализация условий (1) и (4) препятствует реализации условий (2) и (3).

Конструкторам при выборе и назначении величин m_i (шкал измерений) надо учитывать не только характер оптимизационной задачи, но и некоторые особенности измерительной информации. Например, в качестве m_i могут использоваться предельно допустимые значения критериев оптимальности некоторой эталонной РЭС, или значения, которые хотелось бы достигнуть в ходе решения оптимизационной задачи, а в оптимизационных задачах контроля параметров РЭС могут быть использованы их предельно допустимые значения.

Результаты вычислений будем заносить в специальную оценочную таблицу и анализировать их, применяя методы теории матриц. Причем при сравнении систем S_k и S_l k -системы будем располагать в строках, а l -системы – располагать в столбцах таблицы.

Используя выражения из источников [1, 2, 4–8], определяем значения $\mu^u K_i(S_k, S_l)$ и $\mu^u_D K_i(S_k, S_l)$ для каждого частного критерия оптимальности:

$$\mu^u K_1(S_1, S_2) = \frac{[550; 650] - [550; 700]}{1000} = \frac{[-200; 100]}{1000} = [-0,05; 0];$$

$$\mu^u_D K_1(S_1, S_2) = [-0,05; 0] - [0; -0,05] = -0,05.$$

Аналогично рассчитываем остальные значения и затем заносим в табл. 2.

Таблица 2

Оценочная матрица $\mu^u K_i(S_k, S_l)$ и $\mu^u_D K_i(S_k, S_l)$

Вариант проектного решения РЭС S_k	Вариант проектного решения РЭС S_l					
	S_1	S_2	S_3	S_1	S_2	S_3
1	2	3	4	5	6	7
	$\ \mu^u K_1(S_k, S_l)\ $			$\mu^u_D K_1(S_k, S_l)$		
S_1	–	$[-0,05; 0]$	$[0; 0,05]$	–	$-0,05$	$0,05$
S_2	$[0; 0,05]$	–	$[0; 0,1]$	$0,05$	–	$0,1$
S_3	$[-0,05; 0]$	$[-0,1; 0]$	–	$-0,05$	$-0,1$	–

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
$\ \mu^u K_2(S_k, S_l)\ $			$\mu_D^u K_2(S_k, S_l)$			
S_1	–	$[-0,25; -0,05]$	$[-0,05; -0,05]$	–	–0,3	–0,1
S_2	$[0,05; 0,25]$	–	$[0; 0,2]$	0,3	–	0,2
S_3	$[0,05; 0,05]$	$[-0,2; 0]$	–	0,1	–0,2	–
$\ \mu^u K_3(S_k, S_l)\ $			$\mu_D^u K_3(S_k, S_l)$			
S_1	–	$[0,1; 0,1]$	$[-0,1; -0,1]$	–	0,2	–0,2
S_2	$[-0,1; -0,1]$	–	$[-0,2; -0,2]$	–0,2	–	–0,4
S_3	$[0,1; 0,1]$	$[0,2; 0,2]$	–	0,2	0,4	–
$\ \mu^u K_4(S_k, S_l)\ $			$\mu_D^u K_4(S_k, S_l)$			
S_1		$[-0,1; -0,1]$	$[0,2; 0,2]$	–	–0,2	0,4
S_2	$[0,1; 0,1]$	–	$[0,3; 0,3]$	0,2	–	0,6
S_3	$[-0,2; -0,2]$	$[-0,3; -0,3]$	–	–0,4	–0,6	–

После этого, используя выражения из источников [1, 2, 4–8], находим значения $\mu_{ND} K_i(S_k, S_l)$ и $\mu_D^* K_i(S_k)$ и заносим их в табл. 3.

Таблица 3

Оценочная матрица $\mu_{ND} K_i(S_k, S_l)$ и $\mu_D^* K_i(S_k)$

Варианты проектного решения РЭС S_k	Варианты проектного решения РЭС S_l						
	S_1	S_2	S_3	S_1	S_2	S_3	$\mu_D^* K_i(S_k)$
$\mu_{ND} K_2(S_k, S_l)$							
S_1	–	1	1	–	1	1	1
S_2	0,6	–	0,8	0,9	–	0,9	0,9
S_3	0,8	1	–	1	1	–	1
$\mu_D^* K_2(S_k)$	0,6	1	0,8				$\mu_D^* K_4(S_k)$
$\mu_{ND} K_3(S_k, S_l)$							
S_1		0,8	1	–	1	0,6	0,6
S_2	1		1	0,7	–	0,3	0,3
S_3	0,8	0,6		0,6	1	–	0,6
$\mu_D^* K_3(S_k)$	0,8	0,6	1				

Значения $\mu_D^* K_i(S_k)$, которые характеризуют степень близости варианта проектного решения РЭС по рассматриваемому i -му частному критерию оптимальности, выбираем для выполнения условий (1) и (4) – из выделенных (заштрихованных) столбцов таблицы, а для выполнения условий (2) и (3) – из выделенных (заштрихованных) строк и заносим в табл. 4.

Таблица 4

Результирующая матрица оптимального варианта РЭС

Варианты проектного решения РЭС 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

Поскольку $\mu_D^* K_i(S_k)$ определяются в диапазоне $[0;1]$, то выражение $\mu_D^* K_i(S_k)=1$ значит, что проектное решение РЭС S_k будет являться лучшей по i -му скалярному критерию на множестве рассматриваемых проектных решений, а если оно равно 0, то худшей, а значение из интервала $[0; 1]$, характеризует степень приоритета при выборе проектного решения. Чем больше это значение, тем предпочтительнее проектное решение РЭС S_k будет являться лучшим по i -му скалярному критерию оптимальности.

Все частные критерии оптимальности в таблице имеют вид, удобный для сравнения. Анализируя значения $\mu_D^* K_i(S_k)$ и $\mu_D^* K_i(S_l)$, проведем попарное сравнение систем S_k и S_l , исключая неэффективные варианты, и получим в результате требуемый вариант.

Результаты и обсуждение

Таким образом, в соответствии с предлагаемой методикой смысловая содержательность самих критериев не меняется, а вводится понятие их «девиации», искусственного «размывания» на разнородных измерительных шкалах. Предлагаемый подход отличается от методов теории нечетких множеств тем, интервальная функция принадлежности определяется в интервале $[-1;1]$. Это серьезно повышает обоснованность при выборе оптимального проектного решения.

Несмотря на то, что достаточно корректно определяется предпочтительный вариант проектного решения, у такого подхода имеются определенные недостатки:

- 1) отсутствует возможность количественного сравнения соответствующих критериев относительно друг друга;
- 2) отсутствует возможность определения, насколько тестируемый образец РЭС отличается от «идеального» (эталонного);
- 3) диапазон допустимых проектных решений выходных переменных модели оптимизации, вычисленных с помощью интервальных методов, часто оказывается чрезвычайно широким.

Эти проблемы частично устраняются, если применить, например, метод равномерной оптимальности [9, 10], а для последующего уточнения применить, например, байесовский подход к поиску закона распределения. Еще большего эффекта можно достичь, если имеется априорная объективная или эвристическая информация о распределении возможных значений внутри интервала [11, 12]. При этом дополнительно расширяются возможности количественного анализа процессов оптимизации, что позволяет путем попарного сравнения альтернативных вариантов выбрать оптимальный вариант РЭС. Формирование функций принадлежности делает предлагаемый подход субъективным, однако не требует большой выборки статистических данных, что очень облегчает конструкторам принятие решений на финальных этапах проектирования РЭС.

Заключение

Предложенная методика позволяет выбрать предпочтительный вариант проектируемой системы на основе разнородных критериев качества, представленных с различной степенью формализации и интервальной неопределенности. Процесс оптимизации проектного решения РС может быть проведен с использованием векторного критерия оптимальности. Более высокая эффективность предлагаемого метода может быть достигнута путем применения его на этапе тестирования и/или опытной эксплуатации РС, когда проектные параметры часто отклоняются от расчетных и проектировщики рассматривают несколько вариантов конструкций РС, из которых необходимо выбрать оптимальный и доработать его, а также в задачах сравнительного анализа существующих образцов РС. Использование предлагаемой методики позволяет более обоснованно и с небольшими затратами получить решение задачи выбора оптимальной конструкции радиоэлектронных систем по результатам анализа измерительной информации, а также снизить количество повторных этапов проектирования, время и финансовые затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Предлагаемая методика представления и обработки измерительной информации, имеющей различного вида неопределенность, позволяет адекватно отражать разнородную измерительную информацию о качестве тестируемых опытных образцов радиоэлектронных систем и при этом обладает тематической корректностью и приемлемой точностью.

Библиографический список

1. Орловский, С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С. А. Орловский. – Москва : Наука, 1981. – 203 с.
2. Гилл, Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. – Москва : Мир, 1985. – 509 с.
3. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – Москва : Мир, 1976. – 165 с.
4. Шарый, С. П. Конечномерный интервальный анализ / С. П. Шарый. – Новосибирск : XYZ, 2015. – 606 с.
5. Time Factor in the Theory of Anthropogenic Risk Prediction in Complex Dynamic Systems / V. A. Ostreikovsky, Ye. N. Shevchenko, N. K. Yurkov, I. I. Kochegarov, A. K. Grishko // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 944, iss. 1. – P. 1–10. – DOI 10.1088/1742-6596/944/1/012085.
6. Grishko, A. Reliability Analysis of Complex Systems Based on the Probability Dynamics of Subsystem Failures and Deviation of Parameters / A. Grishko, N. Yurkov, N. Goryachev // *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM) : 14th International Conference (Polyana, Svalyava, (Zakarpattya), Ukraine, February 21–25, 2017)*. – Polyana, Svalyava, 2017. – P. 179–182. – DOI 10.1109/CADSM.2017.7916109.
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. Multicriteria Selection of the Optimal Variant of a Complex System Based on the Interval Analysis of Fuzzy Input Data / A. Grishko, E. Danilova, I. Rybakov, E. Lapshin, N. Goryachev // *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT) (Moscow, Russia, March 14–16, 2018)*. – 2018. – P. 1–7. – DOI 10.1109/MWENT.2018.8337237.
9. Grishko, A. Multi-criteria Optimization of the Structure of Radio-electronic System in Indeterminate Conditions / A. Grishko, I. Kochegarov, N. Goryachev // *XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM) (Saint Petersburg, Russia, 2017)*. – Saint Petersburg, 2017. – P. 210–212. – DOI 10.1109/SCM.2017.7970540.
10. Гришко А. К. Прогнозирование и оптимизация управления процессов проектирования сложных технических систем в масштабе реального времени / А. К. Гришко, А. В. Лысенко, С. А. Моисеев // *Надежность и качество сложных систем*. – 2018. – № 1 (21). – С. 40–45. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-1-5.
11. Lysenko, A. Optimizing structure of complex technical system by heterogeneous vector criterion in interval form / A. Lysenko, I. Kochegarov, N. Yurkov, A. Grishko // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1015, iss. 4. – P. 1–6. – DOI 10.1088/1742-6596/1015/4/042032.
12. 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.

References

1. Orlovskiy S. A. *Problemy prinyatiya resheniy pri nechetkoy iskhodnoy informatsii* [Decision making problems with fuzzy source information]. Moscow: Nauka, 1981, 203 p. [In Russian]
2. Gill F., Myurrey U., Rayt M. *Prakticheskaya optimizatsiya* [Practical optimization]. Moscow: Mir, 1985, 509 p. [In Russian]
3. Zade L. A. *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennykh resheniy* [The concept of a linguistic variable and its application to approximate decision making]. Moscow: Mir, 1976, 165 p. [In Russian]
4. Sharyy S. P. *Konechnomernyy interval'nyy analiz* [Finite-dimensional interval analysis]. Novosibirsk: XYZ, 2015, 606 p. [In Russian]
5. Ostreikovsky V. A., Shevchenko Ye. N., Yurkov N. K., Kochegarov I. I., Grishko A. K. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 944, iss. 1, pp. 1–10. DOI 10.1088/1742-6596/944/1/012085.
6. Grishko A., Yurkov N., Goryachev N. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM): 14th International Conference (Polyana, Svalyava, (Zakarpattya), Ukraine, February 21–25, 2017)*. Polyana, Svalyava, 2017, pp. 179–182. DOI 10.1109/CADSM.2017.7916109.
7. Grishko A. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 2 (18), pp. 26–31. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-4. [In Russian]
8. Grishko A., Danilova E., Rybakov I., Lapshin E., Goryachev N. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT) (Moscow, Russia, March 14–16, 2018)*. 2018, pp. 1–7. DOI 10.1109/MWENT.2018.8337237.

9. Grishko A., Kochegarov I., Goryachev N. *XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM) (Saint-Petersburg, Russia, 2017)*. Saint-Petersburg, 2017, pp. 210–212. DOI 10.1109/SCM.2017.7970540.
10. Grishko A. K., Lysenko A. V., Moiseev S. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 1 (21), pp. 40–45. DOI 10.21685/2307-4205-2018-1-5. [In Russian]
11. Lysenko A., Kochegarov I., Yurkov N., Grishko A. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1015, iss. 4, pp. 1–6. DOI 10.1088/1742-6596/1015/4/042032.
12. Grishko A., Goryachev N., Yurkov N. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015, vol. 10, no. 23, pp. 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)

Образец цитирования:

Гришко, А. К. Выбор оптимальной конструкции радиоэлектронной системы на основе интервального анализа девиации проектных параметров, представленных в разнородных измерительных шкалах / А. К. Гришко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 1 (31). – С. 11–20. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-2.

В. В. Авсиевич, А. В. Иващенко

РЕАЛИЗАЦИЯ ДРОБНОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА В ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЕ МУЛЬТИТОПЛИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ АВТОНОМНОГО ЛОКОМОТИВА

V. V. Avsievich, A. V. Ivaschenko

FRACTIONAL PROPORTIONAL-INTEGRAL DIFFERENTIAL CONTROLLER IMPLEMENTATION IN THE INFORMATION and control SYSTEM OF THE AUTONOMOUS LOCOMOTIVE MULTIFUEL ENGINE

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Цель работы состоит в совершенствовании эксплуатационно-технических характеристик двигателя внутреннего сгорания тепловоза, работающего на смеси дизельного топлива и природного газа, путем модернизации информационно-управляющей системы. **Материалы и методы.** Метод исследования основан на реализации алгоритмов дробного пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) управления для повышения устойчивости и качества переходных процессов мультитопливного двигателя. **Результаты.** Результаты работы состоят в реализации предложенной информационно-управляющей системы методом имитационного моделирования и на экспериментальном стенде. Область применения включает модернизацию системы управления двигателя внутреннего сгорания тепловоза. **Выводы.** Выводы заключаются в обосновании преимущества реализации предложенного алгоритма управления по времени переходного процесса и интегральной оценке качества по сравнению с классическим алгоритмом, что позволяет снизить расход топлива.

A b s t r a c t. Background. The paper aims at improving the operational and technical characteristics of the internal combustion engine of a locomotive running on a mixture of diesel fuel and natural gas by modernizing its information and control system. **Materials and methods.** Materials and technologies are based on the implementation of fractional proportional-integral-differential control algorithms to increase the stability and quality of transients of a multi-fuel engine. **Results.** The results of the work consist in the implementation of the proposed information management system by the method of simulation and at the experimental stand. The scope includes the modernization of the control system of an internal combustion engine of a diesel locomotive. **Conclusions.** The conclusions and experimental results prove the benefits of implementing the proposed control algorithm for the transition process time and the integral quality assessment in comparison with the classical algorithm, which allows reducing fuel consumption.

К л ю ч е в ы е с л о в а: информационно-управляющая система, тепловоз, мультитопливный дизельный двигатель, дробный ПИД-регулятор.

K e y w o r d s: information and control system, diesel locomotive, multi-fuel diesel engine, fractional proportional-integral differential controller.

Введение

В современных условиях эксплуатации двигателей внутреннего сгорания автономных локомотивов к ним предъявляются повышенные требования по мощности, экономичности, надежности и экологичности. Дизельные двигатели широко используются на тепловозах в России и за рубежом [1], в связи с чем одним из основных способов модернизации железнодорожного подвижного состава является внедрение мультитопливных двигательных установок, работающих, например, на смеси дизельного топлива и природного газа.

Совершенствование существующих и разработка новых газодизельных конструкций связано с измерением и контролем параметров газодизельного режима с формированием на этой основе моделей подачи топлива. Адекватный выбор типа управляющего и исполнительного регулирующих устройств позволяет повысить эффективность газодизеля [2–4]. Для управления двигательной установкой такого типа на тепловозе актуальным является применение современных алгоритмов регулирования. В данной статье предлагается реализовать дробный пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор [5–8], особенности и преимущества практической реализации которого описаны ниже.

Методы и методология

Электронная информационно-измерительная система (ИИС) управления подачей газа и запальной дозы дизельного топлива в зависимости от уставки и частоты вращения коленчатого вала двухтопливного дизельного двигателя представлена на рис. 1.

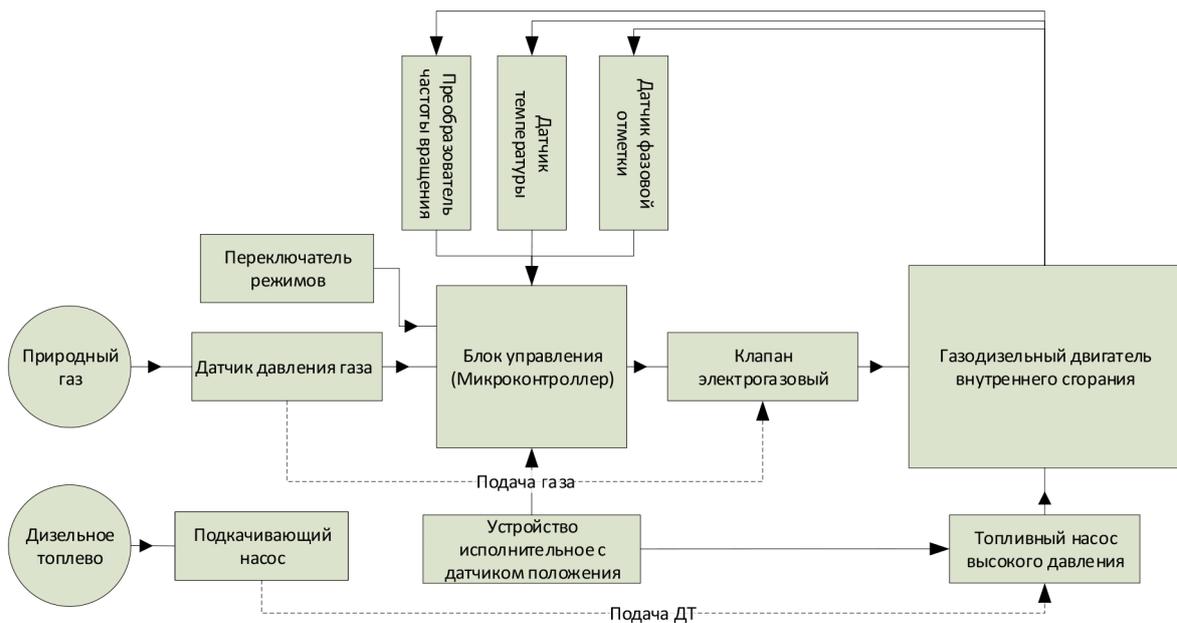


Рис. 1. Схема работы дизельного двигателя, работающего на смеси дизельного топлива и природного газа

Двигатель запускается только на дизельном топливе, для запуска нужно выполнить все операции, предусмотренные для пуска двигателя в соответствии с эксплуатационной документацией. При достижении коленчатым валом двигателя частоты инициализации пуска, блок управления (БУ) выдает на устройство исполнения с датчиком положения (ИУ) ШИМ-сигнал, соответствующий пусковой подаче топлива. После достижения коленчатым валом пусковой частоты вращения (ЧВ) система начинает регулирование ЧВ, и с заданным темпом выводит двигатель на минимальную ЧВ холостого хода.

После запуска двигателя по каналу преобразователя частоты вращения в БУ поступает сигнал о текущем ЧВ коленчатого вала двигателя, который сравнивается с заданным, определяется задатчиком ЧВ. При рассогласовании двух сигналов БУ выдает команду ИУ на изменения подачи топлива. Команда выдается БУ до тех пор, пока текущая ЧВ не сравняется с заданным сигналом.

Работа двигателя в режиме газодизеля осуществляется после пуска и прогрева двигателя. Для перехода необходимо установить тумблер «дизель/газодизель» в положение «газодизель», после этого осуществляется алгоритм автоматического перехода двигателя в газодизельный режим.

Классический ПИД закон управления не позволяет обеспечить высокую скорость переходных процессов без перерегулирования. Для компенсации этого недостатка предлагается использовать дробный пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИ_αД_β) регулятор, использующий [6] следующий закон управления:

$$u(t) = \left[K_n + \frac{I_{0t}^\alpha}{T_n} + T_d D_{0t}^\beta \right] e(t), \quad (1)$$

где $e(t)$ – управляющее воздействие; K_n – коэффициент пропорциональности; I_{0t}^α , D_{0t}^β – дробный интеграл и дифференциал Римана – Лиувилля; $u(t)$ – выходное напряжение ПИ_αД_β регулятора.

На основе этого закона был разработан алгоритм дробного ПИ_αД_β управления:

$$u(n) = u(n-1) + q_0 e(n) + q_1 e(n-1) + q_2 e(n-2) + \varepsilon(n), \quad (2)$$

где

$$q_0 = K_n + \frac{h^\alpha}{T_n} + \frac{T_d}{h^\beta}, \quad q_1 = -K_n + \frac{h^\alpha}{T_n \Gamma(\alpha)} (\Gamma(1+\alpha) - \Gamma(\alpha)) - 2 \frac{T_d}{h^\beta},$$

$$q_2 = \frac{T_d}{h^\beta} + \frac{h^\alpha}{T_n \Gamma(\alpha)} (0,5\Gamma(2+\alpha) - \Gamma(1+\alpha)),$$

$\varepsilon(n) = \frac{h^\alpha}{T_n \Gamma(\alpha)} \sum_{k=3}^{n-1} \left(\frac{\Gamma(k+\alpha)}{(k)!} - \frac{\Gamma(k-1+\alpha)}{(k-1)!} \right) e(n-k)$ – уточняющий коэффициент дробной интегральной составляющей; α, β – дробные степени интеграла и дифференциала соответственно $0 < \alpha, \beta < 1$, t – время, $\Gamma()$ – гамма-функция Эйлера, K_n – пропорциональный коэффициент (коэффициент усиления), T_n – постоянная интегрирования, T_d – постоянная дифференцирования, h – шаг квантования, q_0, q_1, q_2 – настроечные параметры цифрового регулятора.

Реализация данного алгоритма в рамках информационно-управляющей системы мультитопливного двигателя внутреннего сгорания тепловоза позволит повысить устойчивость и качество переходных процессов.

Результаты работы и область применения

Предложенный алгоритм был исследован методом имитационного моделирования с помощью специально разработанной модели газодизельной установки в Matlab Simulink, а также на физической системе автоматического управления на базе лабораторного стенда (рис. 2). Для проведения эксперимента на стенде алгоритм работы дробный ПИД регулятора был записан в высокопроизводительный 16-разрядный микроконтроллер фирмы Microchip Technology Inc. Для проведения эксперимента было использовано программное обеспечение, входящее в состав лабораторной установки (рис. 3).

В ходе моделирования ПИ_αД_β алгоритма в составе ДВС ДТПГ были получены переходные характеристики, представленные на рис. 4. При оптимальных коэффициентах $\alpha = 0,5$ и $\beta = 0,9999$ и одинаковых основных коэффициентах классического ПИД и дробного ПИ_αД_β алгоритма

$$K_n = 4, \quad T_n = 0,0250, \quad T_d = 0,5,$$

где K_n – пропорциональный коэффициент; T_n – постоянная интегрирования; T_d – постоянная дифференцирования.



Рис. 2. Экспериментальная установка (стенд СамГУПС)

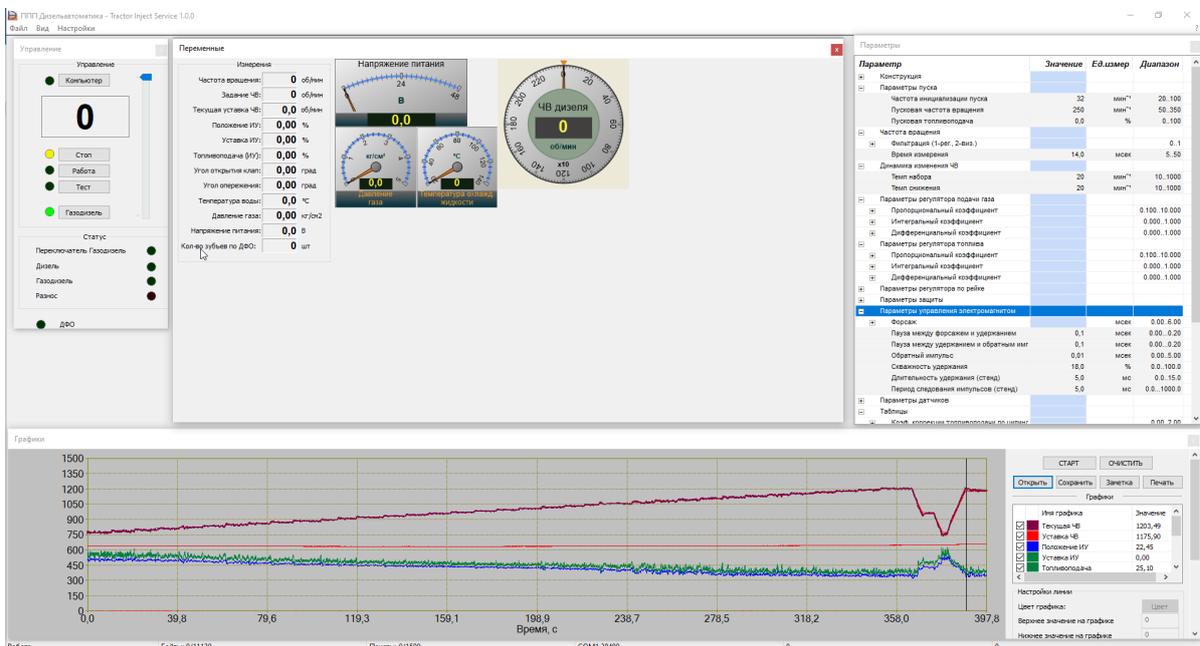


Рис. 3. Программа настройки информационно-управляющей системы

Таким образом, управляя коэффициентами α и β , можно разорвать взаимосвязь между перегулированием и скоростью регулирования.

Выявлено, что преимущество дробного ПИД закона регулирования составляет в среднем по перегулированию на 16 %, по времени переходного процесса – на 47 %, интегральной оценке качества – на 13 %, по сравнению с классическим ПИД законом управления.

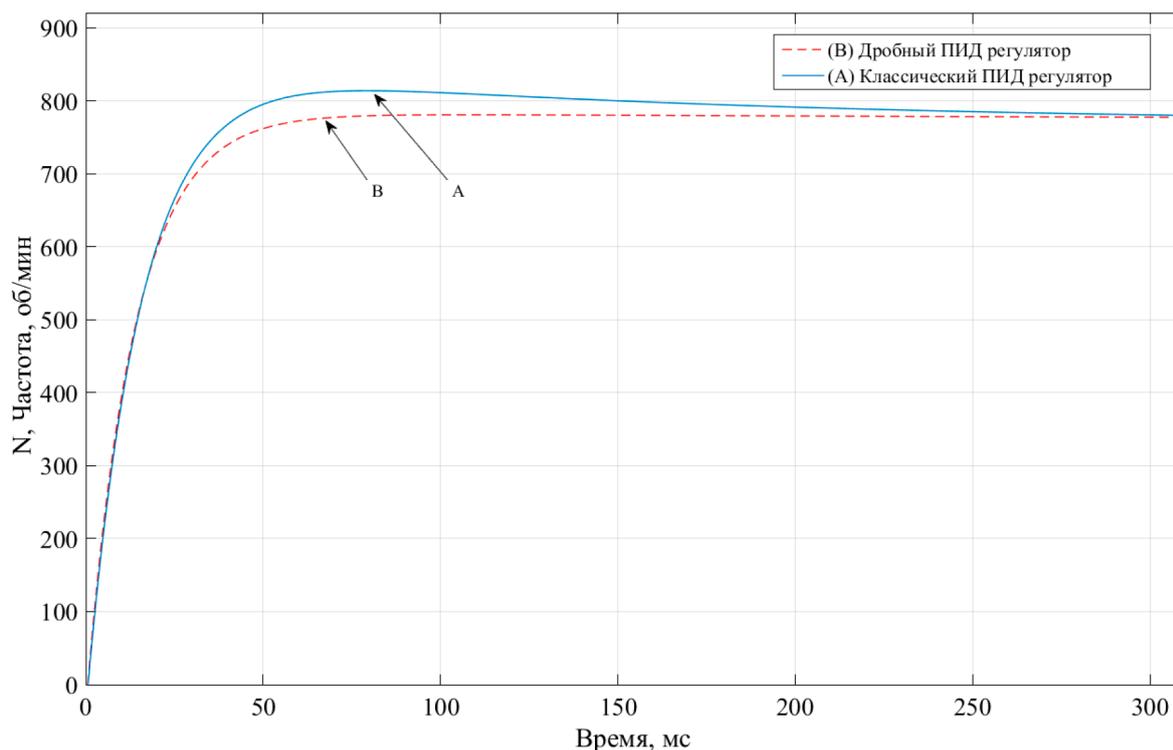


Рис. 4. Результаты моделирования ПИД (А) и ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ (В) алгоритмов управления при частоте 770 об/мин

Результаты экспериментального исследования эффективности дробного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ алгоритма на базе лабораторного стенда приведены на рис. 5, 6. Экспериментальные данные были получены на одинаковом промежутке времени от $t = 0$ до $t = 3,5 \cdot 10^5$ мс при изменении задания частоты вращения коленчатого вала с интервалом времени 10 с.

В результате установлено преимущество дробного ПИД закона управления в среднем по перегулированию на 15 %, времени переходного процесса – на 42 %, интегральной оценке качества – на 26 %, по сравнению с классическим ПИД законом управления.

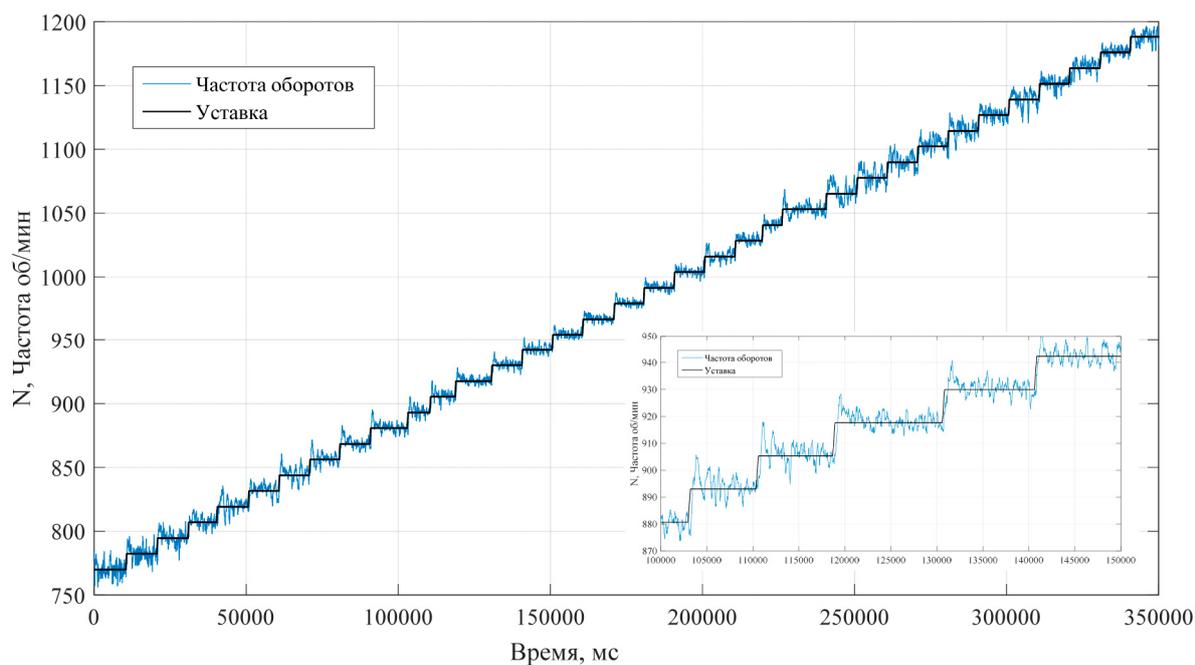


Рис. 5. Результаты исследования эффективности для ПИД алгоритма. Классический ПИД регулятор

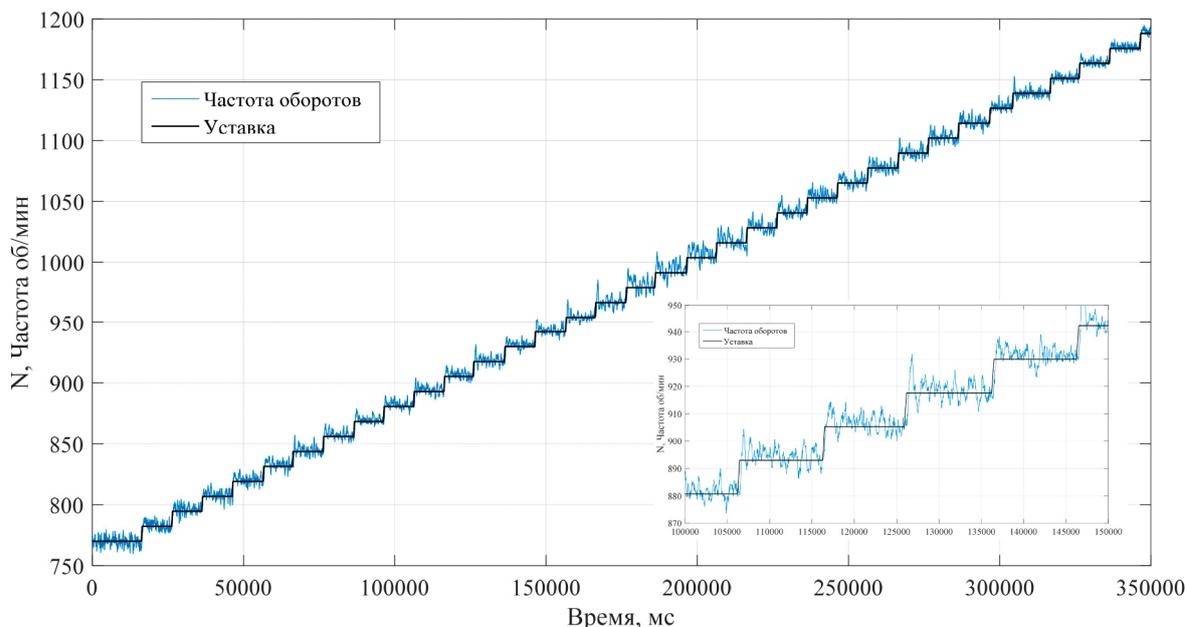


Рис. 6. Результаты исследования эффективности для ПИД-алгоритма. Дробный ПИД регулятор

В результате исследования определен расход топлива с классическим ПИД алгоритмом в среднем по топливоподаче 30,8 % и при использовании дробного ПИД алгоритма 29,2 %. Таким образом, экономия топлива составила 5 %.

Заключение

Основным результатом является то, что при использовании дробного ПИД-алгоритма получена экономия топлива. Таким образом, выявлено преимущество модели с дробным ПИД-алгоритмом по времени переходного процесса и интегральной оценки по сравнению с моделью классического ПИД алгоритма.

Библиографический список

1. *Абрамов, Е. Р.* Локомотивы и моторвагонный подвижной состав с двигателями внутреннего сгорания отечественных железных дорог / Е. Р. Абрамов. – Москва, 2015. – 433 с.
2. Надежность и эффективность МТА при выполнении технологических процессов / А. Т. Лебедев, О. П. Наумов, Р. А. Магомедов, А. В. Захарин, П. А. Лебедев, Р. В. Павлюк. – Ставрополь : АГРУС, 2015. – 332 с.
3. *Гольцяпин, В. Я.* Использование природного газа в качестве моторного топлива в энергетических средствах сельскохозяйственного назначения / В. Я. Гольцяпин. – Москва : ФГНУ «Росинформагротех», 2005. – 40 с.
4. *Ерохов, В. И.* Газодизельные автомобили (конструкция, расчет, эксплуатация) / В. И. Ерохов, А. Л. Карунин. – Москва : Граф-пресс, 2005. – 560 с.
5. *Авсиевич, В. В.* Алгоритм численного дробного ПИД-регулирования / А. В. Авсиевич, В. В. Авсиевич // Сборник трудов Четвертой международной конференции по проблемам управления (Москва, 26–30 января 2009 г.). – Москва, 2009. – С. 164–168.
6. *Авсиевич, В. В.* Моделирование систем автоматического управления с дробным ПИД-регулятором / А. В. Авсиевич, В. В. Авсиевич // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2010. – Вып. 2 (26). – С. 6–12.
7. *Пантелеев, А. В.* Параметрический синтез оптимального в среднем дробного ПИД-регулятора в задаче управления полетом / А. В. Пантелеев, Т. А. Летова, Е. А. Помазуева // Управление большими системами. – 2015. – № 56. – С. 176–200.
8. *Бабошкина, А. А.* Разработка методики настройки коэффициентов ПИД-регулятора дробного порядка с помощью генетического алгоритма / А. А. Бабошкина, П. А. Ушаков, Г. Д. Бабошкин // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства : сб. тр. XIII Междунар. науч.-техн. конф. – Ижевск : Изд-во Ижевского гос. техн. ун-та им. М. Т. Калашникова, 2018. – С. 10–16.

References

1. Abramov E. R. *Lokomotivy i motorvagonnyy podvizhnoy sostav s dvigatelyami vnutrennego sgoraniya otechestvennykh zheleznikh dorog* [Locomotives and motor car rolling stock with internal combustion engines of domestic railways]. Moscow, 2015, 433 p. [In Russian]
2. Lebedev A. T., Naumov O. P., Magomedov R. A., Zakharin A. V., Lebedev P. A., Pavlyuk R. V. *Nadezhnost' i effektivnost' MTA pri vypolnenii tekhnologicheskikh protsessov* [Reliability and efficiency of MTA when performing technological processes]. Stavropol: AGRUS, 2015, 332 p. [In Russian]
3. Gol'tyapin V. Ya. *Ispol'zovanie prirodnogo gaza v kachestve motornogo topliva v energeticheskikh sredstvakh sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya* [Use of natural gas as a motor fuel in agricultural energy products]. Moscow: FGNU «Rosin-formagrotekh», 2005, 40 p. [In Russian]
4. Erokhov V. I., Karunin A. L. *Gazodizel'nye avtomobili (konstruktsiya, raschet, ekspluatatsiya)* [Gas-diesel cars (design, calculation, operation)]. Moscow: Graf-press, 2005, 560 p. [In Russian]
5. Avsievich V. V., Avsievich V. V. *Sbornik trudov Chetvertoy mezhdunarodnoy konferentsiya po problemam upravleniya (Moskva, 26–30 yanvarya 2009 g.)* [Proceedings of the Fourth international conference on management problems (Moscow, January 26-30, 2009)]. Moscow, 2009, pp. 164–168. [In Russian]
6. Avsievich V. V., Avsievich A. V. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Samara state technical University. Ser.: Technical Sciences]. 2010, iss. 2 (26), pp. 6–12. [In Russian]
7. Panteleev A. V., Letova T. A., Pomazueva E. A. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Administration of large systems]. 2015, no. 56, pp. 176–200. [In Russian]
8. Baboshkina A. A., Ushakov P. A., Baboshkin G. D. *Priborostroenie v XXI veke. Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva: sb. tr. XIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Instrumentation in the XXI century. Integration of science, education and production: sat. Tr. XIII Intern. science.- tech. conf.]. Izhevsk: Izd-vo Izhevskogo gos. tekhn. un-ta im. M. T. Kalashnikova, 2018, pp. 10–16. [In Russian]

Авсиевич Владимир Викторович

старший преподаватель,
кафедра мехатроники, автоматизации
и управления на транспорте,
Самарский государственный университет
путей сообщения
(Россия, г. Самара, 1-й Безымянный пер., 16)
E-mail: avsievichv@gmail.com

Avsievich Vladimir Viktorovich

senior lecturer,
sub-department of transport robotics,
automation and control,
Samara State Transport University
(16 1 Bezymyanny lane, Samara, Russia)

Иващенко Антон Владимирович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой вычислительной техники,
Самарский государственный
технический университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: anton.ivashenko@gmail.com

Ivaschenko Anton Vladimirovich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of computer engineering,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

Образец цитирования:

Авсиевич, В. В. Реализация дробного ПИД регулятора в информационно-управляющей системе мультитопливного двигателя внутреннего сгорания автономного локомотива / В. В. Авсиевич, А. В. Иващенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 1 (31). – С. 21–27. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-3.

В. И. Смыслов, Ю. И. Бражников, П. А. Филиппович, С. А. Гурова

АНАЛИЗ И ВЫБОР ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В СИСТЕМАХ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ЖИДКОСТНЫХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

V. I. Smyslov, Yu. I. Brazhnikov, P. A. Filippovich, S. A. Gurova

ANALYSIS AND SELECTION OF TEMPERATURE METERS IN EMERGENCY PROTECTION SYSTEMS FOR LIQUID JET ENGINES

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Проведен анализа требований к измерителям температуры для применения в системах аварийной защиты для жидкостных реактивных двигателей. Обосновано применение для этих целей термоэлектрических преобразователей. Показано, что основными требованиями для них, помимо измерения высокой температуры, является совмещение в них противоречивых характеристик по высокому быстродействию и повышенной массе, вытекающей из требований по повышенной механической прочности и устойчивости. *Материалы и методы.* Для более полного удовлетворения требований САЗ ЖРД предложено использовать термоэлектрические термопреобразователи с чувствительным элементом (ЧЭ) переменного сечения, имеющим повышенное быстродействие при сохранении высокой механической прочности и устойчивости. *Результаты.* Проанализированы типовые конструкторско-технологические решения термоэлектрических преобразователей, используемых на сегодняшний день в САЗ ЖРД. Показано, как улучшить их основные технические характеристики в условиях сверхнапряженных эксплуатационных факторов. *Выводы.* Предложено и обосновано конструкторско-технологическое решение термоэлектрического термопреобразователя с ЧЭ переменного сечения, которое было реализовано на практике. Приведены результаты испытаний, показавшие двукратное увеличение быстродействия без уменьшения механической прочности и устойчивости.

A b s t r a c t. *Background.* An analysis of the requirements for temperature meters for use in the emergency protection systems for liquid jet engines is carried out. The use of thermoelectric converters for these purposes is justified. The indicators confirming the presence of high temperatures are contradictory characteristics due to the high requirements for speed and weight. *Materials and methods.* To better meet the requirements of the SAP LRE, it is proposed to use thermoelectric thermal converters with a sensitive element of variable cross-section, which has increased speed while maintaining high mechanical strength and stability. *Results.* The typical design and technological solutions of thermoelectric converters used today in the SAP LRE are analyzed. It is shown how to improve their basic technical characteristics in the conditions of over-stressed operational factors. *Conclusions.* A design and technological solution of a thermoelectric thermoconverter with ch.e. is proposed and justified. variable section, which was implemented in practice. The test results are shown, which showed a twofold increase in speed without reducing mechanical strength and stability.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ракетно-космическая техника, датчико-преобразующая аппаратура, термопарный кабель, инерционность.

К e y w o r d s: rocket and space technology, sensor-converting equipment, thermocouple cable, lag.

Одной из актуальных задач измерения температуры при обработке и эксплуатации изделий ракетно-космической техники (РКТ) является задача измерения температуры в системах аварийной защиты (САЗ) жидкостных реактивных двигателей (ЖРД). Актуальность задачи обусловлена тем, что на сегодняшний день наиболее информативным параметром, на основании которого можно судить о нахождении ЖРД в аварийном режиме, предшествующем его возгоранию и разрушению, является температурная нестабильность и возникновение пульсаций пламени ЖРД.

В связи с необходимостью измерения температуры пламени ЖРД (превышает 1000 °С) в настоящее время безальтернативным видом измерителей температуры в практике разработки САЗ являются термоэлектрические преобразователи. При этом оптимизация конструкторско-технологических решений таких термопреобразователей представляет собой весьма нетривиальную техническую задачу, что обусловлено необходимостью реализации в них ряда противоречивых требований, помимо стойкости к высоким температурам. В первую очередь, это необходимость сочетания высокого быстродействия (инерционность не более десятков миллисекунд и, соответственно, минимальных массогабаритных характеристик), а также повышенной прочности и устойчивости к воздействию механических, газодинамических (вибрация до нескольких тысяч м/с², скоростной напор до сотен м/с) и прочих факторов.

Как известно [1–3], принцип действия термоэлектрических термопреобразователей (ТТ) основан на использовании термоэлектрического эффекта, при котором в месте контакта двух разнородных проводников-термоэлектродов, составляющих термопару, возникает термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС), которая пропорциональна температуре термоспая. Термо-ЭДС не зависит от длины, диаметра и удельного сопротивления термоэлектродов.

В общем виде термопарные кабели, составляющие основу чувствительных элементов датчика температуры, состоят из металлической оболочки и двух (или более) термоэлектродных жил, изолированных друг от друга [4, 5]. На рис. 1 представлена конструкция термопарного кабеля с рабочим спаем, оболочкой и двумя термоэлектродами.

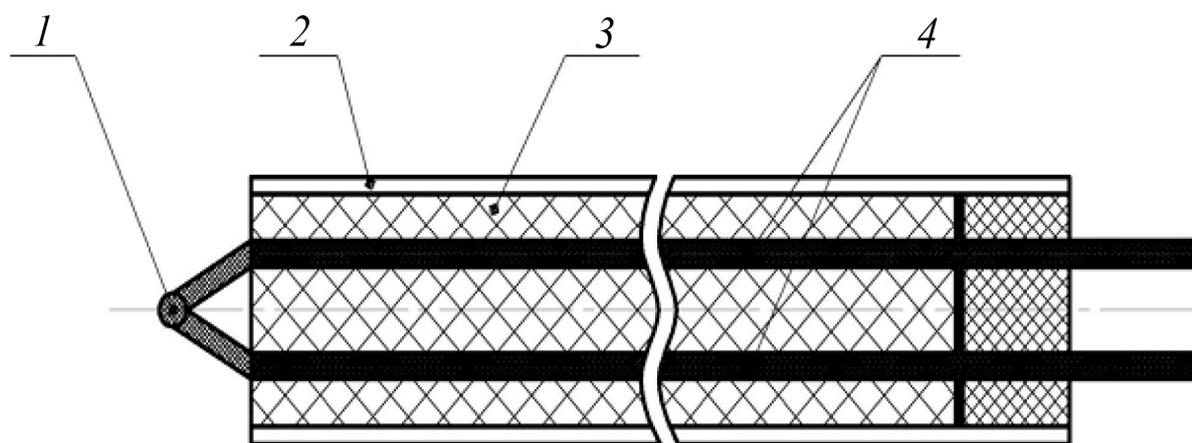


Рис. 1. Типовая конструкция ЧЭ термоэлектрического термопреобразователя:
1 – рабочий спай; 2 – оболочка; 3 – изоляция; 4 – термоэлектроды

Для такого термоэлектрического термопреобразователя с хромель-алюмельными термоэлектродами известна зависимость инерционности в зоне рабочего спая от его сечения и диаметра термоэлектродов (табл. 1) [6].

Таблица 1

Время установления теплового равновесия хромель-алюмельных термоэлектрических термопреобразователей

Диаметр термоэлектродов, мм	Диаметр рабочего спая, мм	Время до установления теплового равновесия, с
0,5	1	0,6–0,8
1,2	2,4	1,20–1,6
1,5	3,0	1,6–2,1

При этом для САЗ ЖРД наибольшее распространение получили термоэлектрические преобразователи на основе следующих конструктивно-технологических исполнений:

- кабель однозонный термопреобразователь круглого постоянного сечения с изолированным рабочим спаем (рис. 2);
- кабель круглого сечения с утоненным рабочим участком (рис. 3);
- кабель с плоским рабочим участком (рис. 4);
- кабель многозонный (рис. 5).

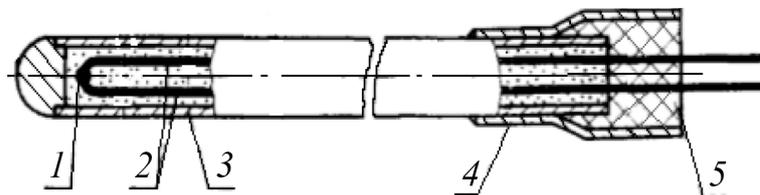


Рис. 2. Термоэлектрический термопреобразователь на основе однозонного термокабеля круглого постоянного сечения с изолированным рабочим спаем:

1 – рабочий спай; 2 – термоэлектроды; 3 – оболочка; 4 – втулка; 5 – герметик

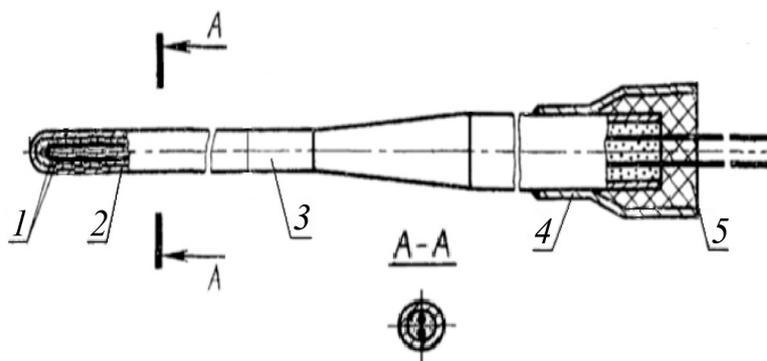


Рис. 3. Термоэлектрический термопреобразователь на основе однозонного кабеля круглого сечения с утоненным рабочим участком:

1 – термоэлектроды; 2 – оболочка; 3 – утоненный участок; 4 – втулка; 5 – герметик

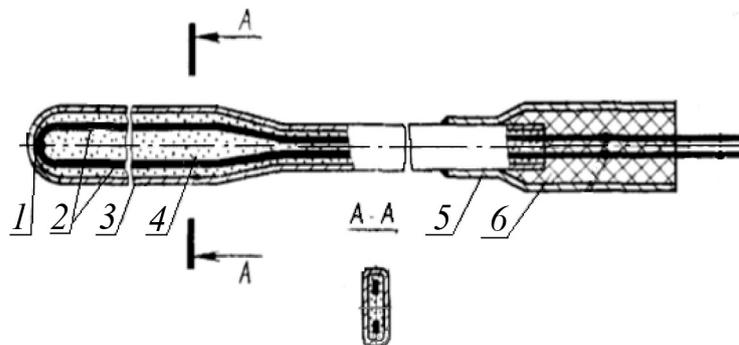


Рис. 4. Термоэлектрический термопреобразователь на основе однозонного кабеля круглого сечения с плоским рабочим участком:

1 – рабочий спай; 2 – термоэлектроды; 3 – оболочка; 4 – изоляция; 5 – втулка; 6 – герметик

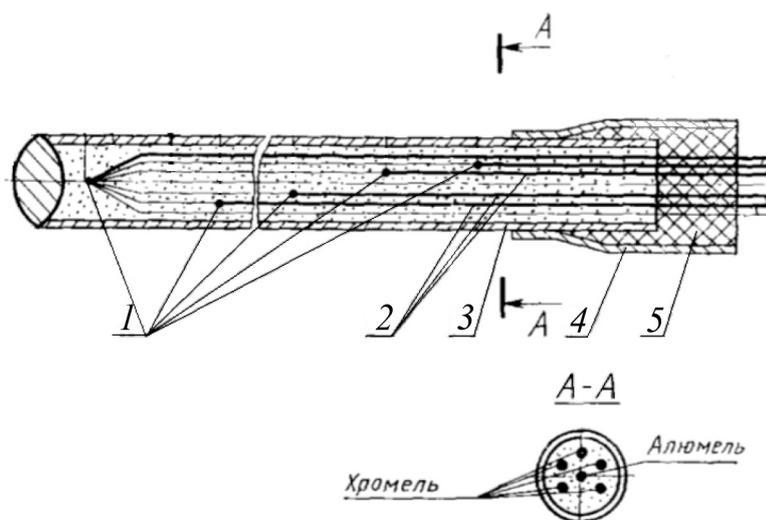


Рис. 5. Термоэлектрический термопреобразователь на основе многозонного кабеля круглого сечения:
1 – рабочий спай; 2 – термоэлектроды; 3 – оболочка; 4 – втулка; 5 – герметик

Очевидно, что вышеуказанные термоэлектрические термопреобразователи не в полной степени отвечают требованиям применения в САЗ ЖРД, так как не позволяют оптимизировать сочетание по инерционности и прочности. Указанное объясняется тем, что повысить прочностные характеристики можно за счет увеличения диаметра термоэлектродов и оболочки, однако это приведет к увеличению инерционности. С другой стороны, уменьшение диаметра термоэлектродов и оболочки приводит к уменьшению инерционности, но одновременно снижается прочность, что является недопустимым по условиям эксплуатации в РКТ.

Для разрешения указанного противоречия предлагается использование термоэлектрических термопреобразователей на основе термопарного кабеля типа КТМС (подходит по требованию температурного диапазона измерения) с переменным сечением, что позволяет уменьшить инерционность за счет уменьшения массы горячего спая и сохранить прочностные характеристики (см. рис. 6).

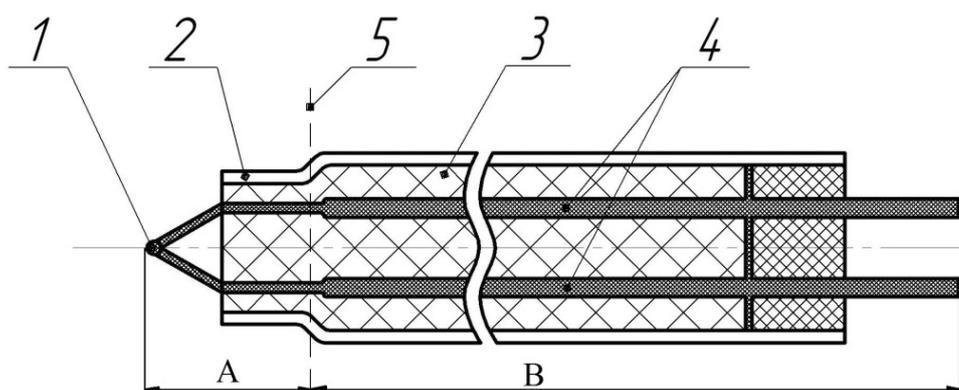


Рис. 6. Термоэлектрический термопреобразователь с переменным сечением
на основе термопарного кабеля КТМС:

1 – рабочий спай; 2 – оболочка; 3 – изоляция; 4 – термоэлектроды; 5 – зона переменного сечения;
А – участок уменьшенного сечения; В – участок без изменения сечения

Преимуществом термопарных кабелей типа КТМС является возможность изготовления из них термоэлектрических термопреобразователей с переменным сечением при любых величинах длин разных по диаметру участков. В месте расположения рабочего спая термоэлектрический термопреобразователь может иметь минимальный диаметр.

Дополнительным преимуществом при внедрении термоэлектрических термопреобразователей с переменным сечением является возможность использования при их изготовлении нашедших уже на практике технологических приемов обработки кабельной продукции, кото-

рые все же требуют некоторой адаптации и усовершенствования применительно к кабелю КТМС.

Для изготовления термоэлектрического термопреобразователя на основе кабеля КТМС с переменным сечением на сегодняшний день наиболее перспективно использование холодного ротационного обжатия, так как по сравнению с другими способами обработки оно позволяет [5]:

- использовать полуую цилиндрическую заготовку;
- получить формоизменение изделия без разрушения;
- деформировать хрупкие материалы;
- произвести подачу изделия на глубину независимо от диаметра;
- получать высокую точность обработки;
- достигать высокую чистоту обработанной поверхности.

Сравнительные показатели обработки изделий методами ротационного обжатия, поперечной прокатки и свободнойковки и приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительные технико-экономические показатели обработки изделий методами ротационного обжатия, поперечной прокатки и свободнойковки

Наименование показателей	Ротационное обжатие		Поперечная прокатка		Свободнаяковка
	Температурный режим обработки				
	без нагрева	с нагревом	без нагрева	с нагревом	с нагревом
Диаметр исходной заготовки в мм: сплошной полый	0,3–60 1–120	1–250 1–320	До 10 До 20	5–250 5–250	До 2800 До 630
Отношение длины обработанного изделия к диаметру заготовки: наибольшее наименьшее	Неограниченное Неограниченное		50–24 1,4–0,8	50–24 1,4–0,8	Неогранич. Неогранич.
Точность обработки в классах	2–3	4–5	2–3	5–9	11–12
Чистота обработанной поверхности	▼8▼9	▼6▼7	▼6▼7	–	–
Экономия металла по отношению к механической обработке в %	До 50	До 50	До 40	До 40	До 15

Из табл. 2 следуют следующие преимущества ротационного обжатия без нагрева:

- диапазон исходного диаметра заготовки при ротационном обжатии шире, чем при поперечном прокате;
- ротационное обжатие позволяет использовать диаметр заготовки, независящий от длины обработанного изделия;
- высокая точность обработки, которая для случаев холодного обжатия соответствует 2–3-му, а для горячей 4–5-му классу. По сравнению со свободнойковкой на 9 классов точнее;
- чистота поверхности ротационного обжатия на единицу качественнее по сравнению с другими методами;
- по сравнению с поперечным прокатом экономия металла у ротационного обжатия на 10 % больше, а по сравнению со свободнойковкой – на 35 %.

Таким образом, выбранная технология холодного ротационного обжатия позволяет в наибольшей степени эффективно изготавливать термоэлектрические термопреобразователи с переменным сечением из термопарного кабеля КТМС для применения в системах САЗ ЖРД. Такое обжатие дает возможность формоизменения кабеля КТМС без разрушения до значительных степеней деформации при высокой точности полученных изделий без нагрева деталей [7].

Технологический процесс отличается простотой, экономичностью, возможностью получения как полуфабрикатов, так и готовых изделий.

Полученные для различных сечений термокабеля КТМС с переменным сечением значения сравнительного времени установления теплового равновесия приведены в табл. 3 [8].

Таблица 3

Сравнительное время установления теплового равновесия
для различных сечений термокабеля КТМС с переменным сечением

Диаметр термоэлектродов, мм		Диаметр рабочего сая, мм		Время до установления теплового равновесия, с	
Однозонный	Участок уменьшенного сечения	Однозонный	Участок уменьшенного сечения	Однозонный	Участок уменьшенного сечения
0,5	0,25	1	0,5	0,6–0,8	0,3–0,4
1,2	0,6	2,4	1,2	1,20–1,6	0,6–0,8
1,5	0,75	3,0	1,5	1,6–2,1	0,8–1,05

Из табл. 3 видно, что данный подход позволяет сохранить прочностные характеристики термоэлектрических термопреобразователей с переменным сечением на уровне типовой конструкции, так как кабель практически по всей длине остается неизменным. Время установления теплового равновесия при этом снижается в два раза.

Библиографический список

1. Фрайден, Дж. Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден ; пер. с англ. Ю. А. Заболотной. – Москва : Техносфера, 2006. – 588 с.
2. Линеveg, Ф. Измерение температур в технике : справочник : пер. с нем. / Ф. Линеveg. – Москва : Metallurgiya, 1980. – 544 с.
3. Датчики : справочное пособие / В. М. Шарапов, Е. С. Полищук, Н. Д. Кошевой, Г. Г. Ишанин, И. Г. Минаев, А. С. Совлюков ; под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. – Москва : Техносфера, 2012. – 624 с.
4. Температурные измерения в ядерных реакторах / Б. В. Лысиков, В. К. Прозоров, В. В. Васильев, Д. Н. Попов, Л. Ф. Громов, Ю. В. Рыбаков. – Москва : Атомиздат, 1975. – 168 с.
5. Сучков, В. Ф. Жаростойкие кабели с магнизиальной изоляцией / В. Ф. Сучков, В. И. Светлова, Е. Е. Финкель. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 120 с.
6. Данишевский, С. К. Высокотемпературные термодары / С. К. Данишевский, Н. И. Сведе-Швец. – Москва : Metallurgiya, 1977. – 232 с.
7. Оборудование для производства : каталог продукции. – URL: http://prom.globatek.ru/metal_pressure/rotary_forging/ (дата обращения: 21.02.2017).
8. Филиппович, П. А. Метод снижения инерционности термодарного кабеля КТМС на основе кабеля переменного сечения для повышения надежности в авиационной и ракетно-космической технике / П. А. Филиппович, С. А. Гурова // Информационно-технологический вестник. – 2019. – № 2 (20). – С. 65–71.
9. Радюченко, Ю. С. Ротационная ковка / Ю. С. Радюченко. – Москва : ГНТИ Машлит, 1962. – 188 с.
10. Шаповал, А. Н. Интенсивные процессы обработки давлением вольфрама и молибдена / А. Н. Шаповал, С. М. Горбатюк, А. А. Шаповалов. – Москва : Руда и Металлы, 2006. – 351 с.

References

1. Frayden Dzh. *Sovremennyye datchiki: spravochnik* [Modern sensors: reference]; transl. from English by Yu. A. Zabolotnaya. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 588 p. [In Russian]
2. Lineveg F. *Izmerenie temperatur v tekhnike: spravochnik : per. s nem.* [Temperature measurement in engineering: reference : transl. from German]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 544 p. [In Russian]
3. Sharapov V. M., Polishchuk E. S., Koshevoy N. D., Ishanin G. G., Minaev I. G., Sovlyukov A. S. *Datchiki: spravochnoe posobie* [Sensors : a reference guide]. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 624 p. [In Russian]
4. Lysikov B. V., Prozorov V. K., Vasil'ev V. V., Popov D. N., Gromov L. F., Rybakov Yu. V. *Temperaturnye izmereniya v yadernykh reaktorakh* [Temperature measurements in nuclear reactors]. Moscow: Atomizdat, 1975, 168 p. [In Russian]

5. Suchkov V. F., Svetlova V. I., Finkel' E. E. *Zharostoykie kabeli s magnezial'noy izolyatsiyey* [Heat-resistant cables with magnesia insulation]. 2nd ed., rev. and suppl. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 120 p. [In Russian]
6. Danishevskiy S. K., Svede-Shvets N. I. *Vysokotemperaturnye termopary* [High temperature thermocouples]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 232 p. [In Russian]
7. *Oborudovanie dlya proizvodstva : katalog produktisii* [Production equipment : product catalog]. Available at: http://prom.globatek.ru/metal_pressure/rotary_forging/ (accessed Febr. 21, 2017). [In Russian]
8. Filippovich P. A., Gurova S. A. *Informatsionno-tekhnologicheskii vestnik* [Information and technological Bulletin]. 2019, no. 2 (20), pp. 65–71. [In Russian]
9. Radyuchenko Yu. S. *Rotatsionnaya kovka* [Rotary forging]. Moscow: GNTI Mashlit, 1962, 188 p. [In Russian]
10. Shapoval A. N., Gorbatyuk S. M., Shapovalov A. A. *Intensivnyye protsessy obrabotki davleniem vol'frama i molibdena* [Intensive pressure treatment processes for tungsten and molybdenum]. Moscow: Ruda i Metally, 2006, 351 p. [In Russian]

Смыслов Владимир Иванович

кандидат технических наук,
главный конструктор по направлению,
Научно-производственное объединение
измерительной техники
(Россия, г. Королев, ул. Пионерская, 2)
E-mail: vladismyslov@yandex.ru

Smyslov Vladimir Ivanovich

candidate of technical sciences,
chief designer in the direction,
Scientific-production association measuring
equipment
(2 Pionerskaya street, Korolev, Russia)

Бражников Юрий Иванович

кандидат технических наук, ведущий инженер,
Центральный научно-исследовательский институт
машиностроения
(Россия, г. Королев, ул. Пионерская, 4)
E-mail: mksagro08@mail.ru

Brazhnikov Yuriy Ivanovich

candidate of technical sciences, leading engineer,
Central Research Institute for Machine Building
(4 Pionerskaya street, Korolev, Russia)

Филиппович Павел Алексеевич

главный технолог,
Научно-производственное объединение
измерительной техники
(Россия, г. Королев, ул. Пионерская, 2)
E-mail: phill07@bk.ru

Filippovich Pavel Alekseevich

chief technologist,
Scientific-production association measuring
equipment
(2 Pionerskaya street, Korolev, Russia)

Гурова Светлана Александровна

магистрант,
Российский университет дружбы народов
(Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6);
инженер,
Научно-производственное объединение
измерительной техники
(Россия, г. Королев, ул. Пионерская, 2)
E-mail: phill07@bk.ru

Gurova Svetlana Aleksandrovna

mastergraduate student,
Peoples' Friendship University of Russia
(6 Miklukho-Maklaya street, Moscow, Russia);
engineer,
Scientific-production association measuring
equipment
(2 Pionerskaya street, Korolev, Russia)

Образец цитирования:

Смыслов, В. И. Анализ и выбор измерителей температуры в системах аварийной защиты для жидкостных реактивных двигателей / В. И. Смыслов, Ю. И. Бражников, П. А. Филиппович, С. А. Гурова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 1 (31). – С. 28–34. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-4.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 629.78.023

DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-5

*А. С. Ишков, А. С. Петров, Г. А. Солодимова, Д. В. Егоров*ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЕЗИСТОРОВ
В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ*A. S. Ishkov, A. S. Petrov, G. A. Solodimova, D. V. Egorov*THE RESEARCH OF THE RELIABILITY
OF ELECTRONIC PRODUCTS UNDER
THE INFLUENCE OF IONIZING RADIATION

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования являются резисторы, широко используемые в составе аппаратуры, которая в процессе своей работы может подвергаться различным видам радиационного излучения. Предметом исследования являются радиационные испытания резисторов для определения их способности сохранять значения параметров-критериев годности в пределах заданных норм в процессе и (или) после радиационного воздействия. Целью работы является разработка эффективных способов проведения радиационных испытаний резисторов с целью оценки их надежности. **Материалы и методы.** Для проведения исследований по радиационной стойкости резисторов применен экспериментальный метод, основанный на использовании моделирующих установок, представляющих источники радиационных воздействий, имеющих единую или близкую физическую природу и характеристики с радиационными факторами, воздействующими на резисторы в реальных условиях эксплуатации. **Результаты.** Предложена схема для измерения сопротивления резисторов при воздействии радиационного излучения. Получены осциллограммы изменения сопротивления резисторов в процессе воздействия гамма-излучения. **Выводы.** Получены данные о наличии резкого обратимого уменьшения сопротивления резисторов во время и непосредственно после облучения. Определены факторы, влияющие на надежность резисторов, и уровни снижения сопротивления при радиационном воздействии. Определено время потери работоспособности резисторов в условиях ионизирующего излучения.

A b s t a r c t. Background. The object of study are resistors that are widely used in equipment, which in the course of its work can be exposed to various types of radiation. The subject of the study is the radiation tests of resistors to determine their ability to preserve the values of the parameters-criteria of validity within specified standards in the process and (or) after radiation exposure. The aim of the work is to develop effective methods for conducting radiation tests of resistors. **Materials and methods.** To conduct research on the radiation resistance of resistors, an experimental method was used based on the use of modeling facilities representing

radiation sources that have a single or close physical nature and characteristics with radiation factors acting on the resistors in real operating conditions. **Results.** A circuit is proposed for measuring the resistance of resistors when exposed to radiation. Typical waveforms of changes in the resistance of resistors in the process of exposure to gamma radiation are obtained. **Conclusions.** Data on the presence of a sharp reversible decrease in the resistance of resistors during and immediately after ionizing radiation are obtained. The factors affecting the time of the loss of operability of the resistors and the degree of decrease in resistance during radiation exposure are determined.

К л ю ч е в ы е с л о в а: резисторы, надежность, испытание, сопротивление, ионизирующее излучение, радиационная стойкость.

Key words: resistors, reliability, testing, resistance, ionizing radiation, radiation resistance.

Введение

Сложные системы, в том числе и технические, требуют обеспечения высокого уровня качества функционирования и надежности. Это требование становится особенно актуальным в случае, когда от работы системы зависит выполнение поставленной оперативно-функциональной задачи, сопряженной с опасностью потери человеческих жизней или значительных капитальных финансовых вложений. Под надежностью системы принято понимать свойство сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность системы выполнять требуемые функции в заданных условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Увеличение числа выполняемых радиоэлектронными системами (РЭС) функций с одновременным ужесточением требований к качественным и количественным показателям требует существенного повышения качества и надежности комплектующих изделий, резисторы среди которых являются самыми используемыми. И, несмотря на снижение доли дискретных пассивных компонентов (резисторов и конденсаторов) в составе РЭС, их производство в настоящее время не только не уменьшается, но и увеличивается на 10–20 % в год и к настоящему времени составляет около 1 трлн шт.

В настоящее время перспективным является комплексный подход по обеспечению производства резисторов с высокими показателями надежности. Данный подход включает установление научно обоснованной связи между показателями надежности и электрофизическими параметрами резисторов, разработку эффективных методов испытаний, приближение испытательных режимов к эксплуатационным, использование средств измерений с высокими метрологическими характеристиками и автоматизированных испытательных установок, прогнозирование показателей надежности.

Постановка задачи исследования

Ионизирующее излучение (ИИ) – это любое излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию неравновесных электрических зарядов разных знаков [1]. Ионизирующее излучение представляет собой поток заряженных и (или) незаряженных частиц, энергия которых достаточна для возбуждения и ионизации атомов вещества. Излучение, ионизирующее косвенно, состоит из незаряженных (нейтральных) частиц (нейтроны, фотоны), способных вызвать ионизацию вещества через вторичные заряженные частицы, образующиеся в результате взаимодействия первичных частиц с атомами среды [2].

Резисторы в процессе работы РЭС могут подвергаться облучению различными ионизирующими излучениями: электронами и протонами радиационных поясов Земли, космическими лучами, гамма-нейтронным излучением ядерных энергетических установок, излучением ускорителей частиц, рентгеновских и гамма установок, медицинских аппаратов.

Для оценки способности резистора выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах установленных норм в процессе и после воздействия ИИ применяются показатели радиационной стойкости. Под радиационной стойкостью резистора понимается его способность восстанавливать свое сопротивление в процессе и после воздействия ИИ [2]. Эта спо-

способность зависит от конструкции резистора, применяемых материалов, а также уровня ИИ. Особенностью функционирования резисторов при их облучении является наличие так называемой временной потери работоспособности, которая может быть как обратимой, так и нет. Чем меньше время потери работоспособности резистора, тем выше его радиационная стойкость, а следовательно, и надежность.

В решении проблемы обеспечения качества РЭС значительная роль принадлежит испытаниям ее комплектующих, позволяющим установить соответствие изделий требуемым параметрам и выявить технологические недостатки [3]. Испытания комплектующих проводят для определения их способности сохранять свой внешний вид и значения параметров в пределах установленных норм [4]. Радиационные испытания резисторов являются одной из составляющих комплексной системы обеспечения качества РЭС.

Анализ методов исследования

Радиационные испытания резисторов проводятся с целью определения и прогнозирования радиационных эффектов в процессе и (или) после радиационного или комбинированного воздействия (радиационного и температурного) на него, а также способности резистора сохранять значения параметров-критериев годности в пределах, установленных в нормативно-технической документации на аппаратуру или техническом задании на проведение радиационных испытаний.

Традиционными являются три основных способа проведения радиационных испытаний любого объекта испытаний [1].

Первый способ – натурный, при котором на местности воспроизводится реальная радиационная обстановка, соответствующая возможным условиям применения объекта. В настоящее время, учитывая запрет на проведение ядерных натуральных испытаний в целях обеспечения безопасности людей и недопущения радиационного загрязнения местности, данный способ применен быть не может.

Второй способ – теоретический. Для использования данного способа необходимо наличие функциональных взаимосвязей между характеристиками ИИ и первичными радиационными дефектами, которые затем применяются для прогнозирования изменения соответствующих параметров объекта.

Третий способ основан на использовании моделирующих или имитирующих установок. Моделирующие установки представляют собой источники радиационных воздействий (изотопные гамма-источники, установки тормозного гамма-излучения, ускорители заряженных частиц), имеющие такие радиационные характеристики, которые могут воздействовать на изделия в реальных их условиях эксплуатации. В отдельных случаях при испытаниях используются имитирующие установки на основе лазерных и рентгеновских имитаторов, т.е. источники воздействий различной физической природы, обеспечивающие адекватное проявление и моделирование в изделиях доминирующих эффектов, вызываемых воздействием радиационных факторов в реальных условиях эксплуатации изделий.

Имитационные испытания обычно проводятся, когда отсутствуют соответствующие моделирующие установки, а также при отработке методик аттестационных испытаний в части выбора параметров-критериев стойкости, режимов и условий испытаний, при проверке применяемых технологических, конструктивно-топологических, схемотехнических и функциональных решений, направленных на снижение радиационной чувствительности изделий в процессе их разработки, при проведении периодических испытаний в условиях неритмичного производства и изготовления изделий малыми партиями.

Принципиальной особенностью проведения радиационных испытаний на моделирующих установках является дистанционный контроль регистрируемых параметров объекта в процессе и после облучения [1]. При этом для обеспечения дистанционного контроля применяются специализированные измерительные линии, учитывающие специфику моделируемого радиационного воздействия.

Авторами предлагается информационно-измерительной системы мониторинга параметров-критериев годности резисторов в процессе проведения радиационных испытаний с использованием моделирующей установки. Обобщенная структурная схема предложенной системы приведена на рис. 1. В ее состав входит моделирующая установка (МУ), испытываемые

резисторы (ИР), детекторы излучения (ДИ), блок питания (БП), дозиметр (Д), цепь синхронизации (ЦС), нормирующий усилитель (НУ), ПЭВМ/осциллограф.

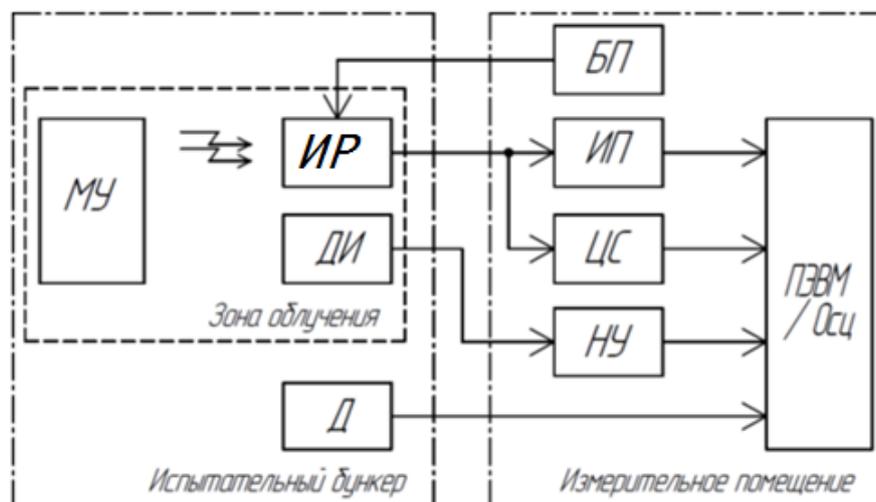


Рис. 1. Обобщенная структурная схема информационно-измерительной системы мониторинга параметров-критериев годности резисторов с использованием моделирующей установки

Испытуемые резисторы размещаются в зоне облучения, создаваемой моделирующей установкой. Моделирующая установка расположена в испытательном бункере. Дозиметр позволяет контролировать наличие биологической защиты, которая необходима для локализации моделируемых ионизирующих излучений внутри технологического помещения и обеспечения безопасности персонала и контрольно-измерительного оборудования, размещающихся в измерительном помещении. Предполагаемый уровень моделируемого воздействия задается с помощью картограмм полей излучения путем выбора расстояния от объекта испытаний до выводного узла МУ. Конкретное значение достигнутых при испытаниях уровней облучения определяется в процессе испытаний по показаниям детекторов излучения ДИ, тип которых зависит от моделируемого воздействия. Также при импульсном воздействии детекторы излучения ДИ формируют электрический сигнал, характеризующий форму моделируемого воздействия. Для синхронизации работы контрольно-измерительной аппаратуры и моделирующей установки используется цепь синхронизации.

С помощью БП по измерительной линии устанавливаются требуемые электрические режимы на испытуемые резисторы. Отклик на радиационное воздействие по измерительной линии поступает для регистрации на измерительные входы контрольно-измерительной аппаратуры. Наличие необходимой биологической защиты испытательного бункера ограничивает минимальную длину измерительных линий, что должно быть учтено при разработке методик проведения испытания конкретных испытуемых образцов с целью максимальной достоверности получаемых результатов. Отличительной особенностью проведения испытаний на некоторых моделирующих установках является наличие сопутствующих электромагнитных помех достаточно высокого уровня, поэтому используются специальные методы защиты измерительных линий от воздействия электромагнитных наводок [5].

На достоверность результатов радиационных испытаний и уровни радиационной нагрузки существенно влияет объем выборки испытуемых изделий [6]. Для подтверждения стойкости резисторов к воздействию ионизирующего излучения с заданной вероятностью сохранения параметров в пределах установленных норм необходимо оценить количество испытуемых резисторов N в выборке по следующей формуле: устанавливается в зависимости от условий обеспечения установленных в нормативно-технической документации значений вероятности p и степени доверия (доверительной вероятности, надежности) γ и определяется следующей формулой [7]:

$$N = \frac{\ln(1-\gamma)}{\ln p},$$

где p – вероятность сохранения параметров в пределах установленных норм, например, $p = 0,95$; γ – степени доверия, например, $\gamma = 0,9$.

В соответствии с существующими нормативными требованиями в зависимости от определенного количества изделий N в выборке устанавливается соответствующий коэффициент увеличения радиационной нагрузки при испытаниях, который может изменяться в диапазоне от 1,0 до 2,24 [7].

Результаты исследования

Авторами проведены исследования радиационной стойкости ряда образцов прецизионных сверхминиатюрных малоиндуктивных проволочных резисторов и фольговых наборов резисторов, широко используемых в узлах и блоках РЭС различного применения. Исследования были направлены на определение времени потери работоспособности изделий в условиях ИИ. Испытаниям подверглись различные образцы проволочных резисторов и фольговых наборов резисторов с номинальным сопротивлением от 10 до 10^4 Ом, номинальной мощностью рассеяния от 0,2 до 1 Вт и допуском отклонением от номинального сопротивления 0,01; 0,02; 0,05 %.

Для оценки надежности резисторов и наборов резисторов (далее изделий) в условиях ИИ используется параметр-критерий годности изделий – относительное отклонение сопротивления, которое измеряется до, в процессе и после радиационного воздействия.

Относительное отклонение сопротивления в результате радиационного воздействия на испытываемое изделие вычисляется по формуле [8]

$$\delta R = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \cdot 100 \%,$$

где R_1 – сопротивление резистора, измеренное до испытания; R_2 – сопротивление резистора, измеренное во время или после испытания.

До испытаний значение сопротивления изделий измеряется с помощью цифрового омметра, который подключается непосредственно к выводам изделия. В процессе проведения испытаний для измерения сопротивления на соответствующие выводы изделия припаиваются соединительные провода, с помощью которых к изделию подключается омметр. При воздействии импульсного ИИ с уровнем до 4Ус, созданного МУ, с помощью осциллографа определяется изменение сопротивления резисторов в процессе воздействия. Схема измерения сопротивления испытываемого изделия (R) приведена на рис. 2.

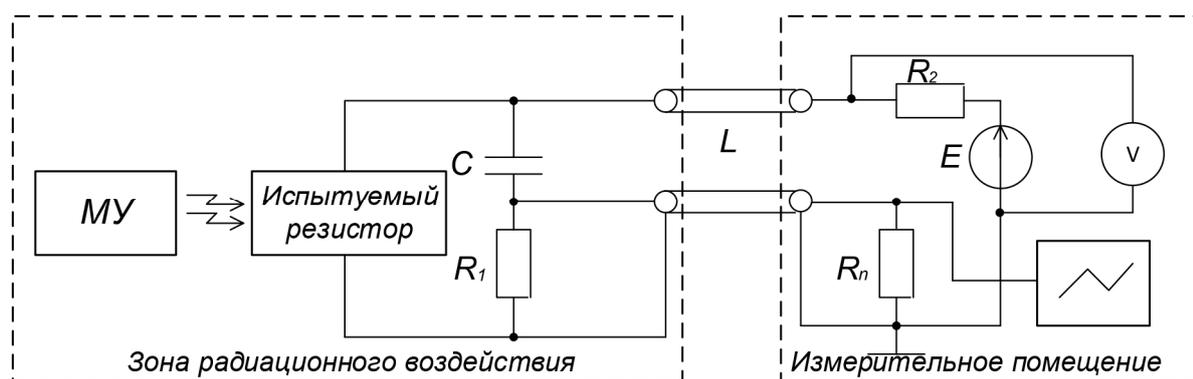


Рис. 2. Схема измерения сопротивления испытываемого изделия в процессе радиационного воздействия

Сопротивление резистора R_1 и согласующей нагрузки R_n берется равным волновому сопротивлению кабельной линии ρ . Для предотвращения шунтирования согласующей нагрузки внутренним сопротивлением источника питания в цепь включается зарядное сопротивление R_2 величиной от 1 до 5 кОм. Емкость разделительного конденсатора C (безиндуктивный керамический типа К15-5 или аналогичный) выбирается из условия минимального искажения регистрируемого сигнала цепью $R_1 - C$:

$$C \geq 10 \tau_n / R_n^*,$$

где τ_n – эффективная длительность импульса радиационного воздействия; $R_n^* = 0,5\rho$ – значение сопротивления для согласованной линии передачи сигнала.

Для контроля формы изменения значения сопротивления используется цифровой осциллограф. Резисторы подключаются к схеме измерения через соединительную линию (L), в качестве которой используется радиочастотный кабель РК75(50). Вольтметр (V) применяется для контроля уровня напряжения E , прикладываемого к испытуемому изделию (R).

Полученные в результате проведенных испытаний осциллограммы изменения сопротивления резисторов в процессе воздействия мощности дозы гамма-излучения приведены на рис. 3 и 4.

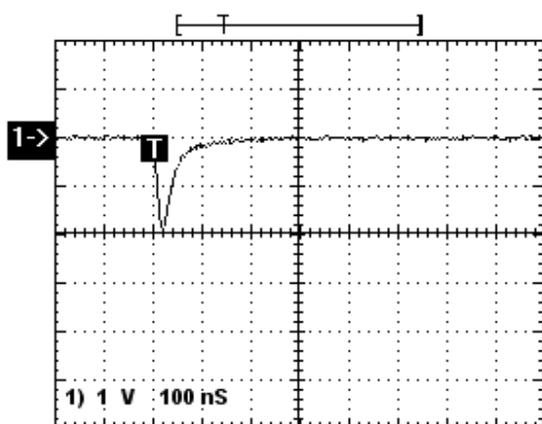


Рис. 3. Осциллограмма изменения сопротивления резисторов с сопротивлением 1 кОм, мощностью 0,5 Вт в процессе радиационного воздействия

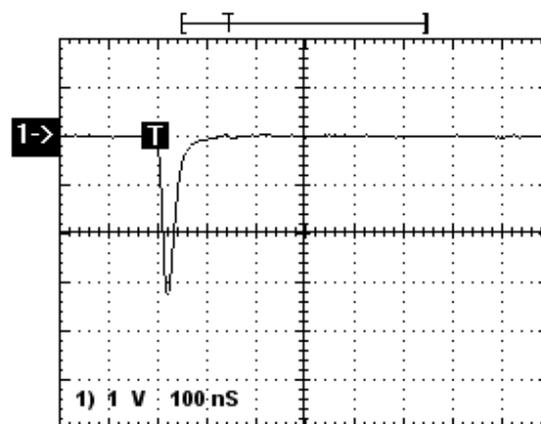


Рис. 4. Осциллограмма изменения сопротивления наборов резисторов 10 кОм, мощностью 0,2 Вт в процессе радиационного воздействия

Заключение

Полученные в результате исследования данные свидетельствуют о том, что ИИ вызывает в испытуемых изделиях обратимое появление проводимости в диэлектрических материалах керамического основания, защитных покрытиях и окружающем воздухе. Установлено, что вызванное воздействием ИИ появление проводимости приводит к резкому обратимому уменьшению сопротивления резисторов во время и непосредственно после облучения.

Степень снижения сопротивления пропорциональна интенсивности воздействующих факторов и зависит от характеристик диэлектрических материалов, номинала резисторов и характеристик окружающей среды. Полученные в ходе исследования результаты свидетельствуют о том, что время потери работоспособности в процессе радиационного воздействия в большой степени зависит от длительности импульса ИИ. На основе полученных осциллограмм изменения сопротивления изделий в процессе радиационного воздействия определено, что для испытуемых образцов время потери работоспособности составит от 100 до 200 нс.

Получены экспериментальные данные о том, что в условиях окружающей воздушной среды реакция резисторов на ИИ практически полностью определяется взаимодействием проводящих элементов их конструкции с окружающим ионизированным воздухом.

Время восстановления сопротивления резисторов после окончания радиационного воздействия определяется запаздывающими составляющими радиационной проводимости диэлектрических материалов конструкции резисторов и воздуха, так как мгновенная составляющая наведенной проводимости практически повторяет форму импульса ИИ.

Библиографический список

1. Горячева, Г. А. Действие проникающей радиации на радиодетали / Г. А. Горячева, А. А. Шапкин, Л. Г. Ширшев. – Москва : Атомиздат, 1971. – 122 с.

2. Хала, И. Радиоактивность, ионизирующее излучение и ядерная энергетика / И. Хала, Дж. Д. Навратил. – Москва : ЛКИ, 2013. – 432 с.
3. Ишков, А. С. Автоматизированная система для повышения надежности и эффективности испытаний на импульсную термоэлектротренировку изделий электронной техники / А. С. Ишков, Г. А. Солодимова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2017. – № 2. – С. 43–46.
4. ГОСТ 16504-81. СГИП. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.
5. Годовицын, В. А. Влияние мощных импульсных помех на работу автоматизированных систем физического эксперимента / В. А. Годовицын // Автоматизация физических исследований. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – С. 189–193.
6. РД В 319.03.31-99. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Рациональный состав и последовательность испытаний на соответствие заданным требованиям по радиационной стойкости.
7. РДВ 319.03.31-99. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Рациональный состав и последовательность испытаний на соответствие заданным требованиям.
8. ГОСТ 2134220-78. Резисторы. Метод измерения сопротивления.

References

1. Goryacheva G. A., Shapkin A. A., Shirshov L. G. *Deystvie pronikayushchey radiatsii na radiodetali* [Effect of penetrating radiation on radio components]. Moscow: Atomizdat, 1971, 122 p. [In Russian]
2. Khala I., Navratil Dzh. D. *Radioaktivnost', ioniziruyushchee izluchenie i yadernaya energetika* [Radioactivity, ionizing radiation and nuclear power]. Moscow: LKI, 2013, 432 p. [In Russian]
3. Ishkov A. S., Solodimova G. A. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, monitoring, diagnostics]. 2017, no. 2, pp. 43–46. [In Russian]
4. GOST 16504-81. SGIP. *Ispytaniya i kontrol' kachestva produktsii. Osnovnye terminy i opredeleniya* [GOST 16504-81. SGIP. Product testing and quality control. Basic terms and definitions]. [In Russian]
5. Godovitsyn V. A. *Avtomatizatsiya fizicheskikh issledovaniy* [Automation of physical research]. Moscow: Energoatomizdat, 1985, pp. 189–193. [In Russian]
6. RD V 319.03.31-99. *Izdeliya elektronnoy tekhniki, kvantovoy elektroniki i elektrotekhnicheskie voennogo naznacheniya. Ratsional'nyy sostav i posledovatel'nost' ispytaniy na sootvetstvie zadannym trebovaniyam po radiatsionnoy stoykosti* [RD AT 319.03.31-99. Electronic equipment, quantum electronics, and military electrical products. Rational composition and sequence of tests for compliance with the specified requirements for radiation resistance]. [In Russian]
7. RDV 319.03.31-99. *Izdeliya elektronnoy tekhniki, kvantovoy elektroniki i elektrotekhnicheskie. Ratsional'nyy sostav i posledovatel'nost' ispytaniy na sootvetstvie zadannym trebovaniyam* [RDV 319.03.31-99. Electronic equipment, quantum electronics, and electrical products. Rational composition and sequence of tests for compliance with the specified requirements]. [In Russian]
8. GOST 2134220-78. *Rezistory. Metod izmereniya soprotivleniya* [GOST 2134220-78. Resistors. Resistance measurement method]. [In Russian]

Ишков Антон Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиотехники и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ishkovanton@mail.ru

Ishkov Anton Sergeevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio engineering
and electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Петров Александр Сергеевич

кандидат технических наук,
начальник отдела управления
радиационных испытаний,
Научно-исследовательский институт приборов
(Россия, Московская обл., г. Лыткарино,
промзона Тураево, строение 8)
E-mail: as_petrov@inbox.ru

Petrov Aleksandr Sergeevich

candidate of technical sciences,
head of department of radiation tests,
Scientific Research Institute of Devices
(building 8, industrial zone Turayev, Lytkarino,
Moscow region, Russia)

Солодимова Галина Анатольевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: solodimova@mail.ru

Solodimova Galina Anatol'evna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information-measuring
technique and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Егоров Денис Владимирович

начальник отдела надежности и испытаний,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: edv.egorov@ya.ru

Egorov Denis Vladimirovich

head of department of reliability and testing,
Scientific Research Institute
of Electro-mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Ишков, А. С. Исследование надежности резисторов в условиях воздействия ионизирующего излучения / А. С. Ишков, А. С. Петров, Г. А. Солодимова, Д. В. Егоров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 1 (31). – С. 35–42. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-5.

М. С. Ревунов, Е. Н. Салмов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОТОКА БУМАЖНОЙ МАССЫ НА СЕТКЕ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

M. S. Revunov, E. N. Salmov

SIMULATION OF THE SURFACE OF A PAPER FLOW

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. При работе на длинносеточных бумагоделательных машинах (БДМ) остро стоит вопрос стабилизации параметров (в частности, угла падения и скорости напуска) потока бумажной массы, идущей из напорного или напускного устройства. Применение контактных методов измерения скорости невозможно, так как прибор нарушает целостность потока и, соответственно, разрушает сам процесс формирования бумажного полотна на сетке. Применение лазерных измерителей затрудняется конструктивными особенностями сеточного стола. Таким образом, на первый план выходят оптические измерители скорости потока жидкости на базе кросскорреляционного алгоритма. Однако обосновать применимость данного метода на действующей БДМ невозможно без ряда сложных, ресурсоемких экспериментов. Целью работы является создание модели поверхности потока бумажной массы на сетке БДМ и оценка с ее помощью основных характеристик бесконтактного метода измерения скорости на базе кросскорреляционного алгоритма. **Материалы и методы.** В работе использованы методы современной теории автоматического управления и автоматизации технологических процессов, методы цифровой обработки изображений и трассерной визуализации, компьютерное моделирование. **Результаты.** Создана модель поверхности потока бумажной массы на сеточной части БДМ. **Выводы.** Оценка основных характеристик бесконтактного способа измерения скорости на базе кросскорреляционного алгоритма с помощью модели поверхности потока бумажной массы позволяет говорить о применимости метода для вышеуказанных целей.

A b s t r a c t. Background. On long-mesh papermaking machines (BDM), the issue of stabilization of the parameters (in particular, the angle of incidence and the rate of discharge) of the flow of paper mass coming from the pressure or discharge device is acute. The use of contact methods of speed measurement is impossible, since the device violates the integrity of the flow and, accordingly, destroys the process of forming a paper web on the grid. The use of laser meters is complicated by the design features of the grid table. Thus, optical liquid flow velocity meters based on a cross-correlation algorithm come to the fore. However, it is impossible to justify the applicability of this method on the current BDM without a number of complex, resource-intensive experiments. The purpose of this work is to create a model of the paper mass flow surface on the BDM grid and to evaluate the main characteristics of the non-contact speed measurement method based on the cross-correlation algorithm. **Materials and methods.** The paper uses methods of modern theory of automatic control and automation of technological processes, methods of digital image processing and tracer visualization, computer modeling. **Results.** A model of the paper mass flow surface on the grid part of the BDM was created. **Conclusions.** Evaluation of the main characteristics of the non-contact method of speed measurement based on the cross-correlation algorithm using the paper mass flow surface model allows us to talk about the applicability of the method for the above purposes.

К л ю ч е в ы е с л о в а: бумагоделательные машины, бесконтактный способ измерения скорости, кросскорреляционный алгоритм.

К e y w o r d s: papermaking machines, contactless speed measurement, cross-correlation algorithm.

Постановка задачи

Вес 1 м^2 бумаги (картона) является одним из основных показателей качества продукции [1, 2]. Среди множества взаимосвязанных факторов, влияющих на дисперсию веса бумаги или картона, в первую очередь выделяют угол и скорость напуска массы на сеточную часть бумагоделательной машины (БДМ) [3]. Таким образом, для стабилизации веса 1 м^2 бумаги (картона) необходимо ввести дополнительные контуры регулирования [4], оснащенные бесконтактными оптическими измерителями скорости потоков жидкости [5]. Наиболее перспективным методом бесконтактного измерения скорости потока жидкости, который может быть применен на длинносеточных БДМ, является кросскорреляционный алгоритм [5, 6]. Однако оценить характеристики кросскорреляционного измерителя скорости на действующей БДМ проблематично, так как эксперименты приводят к нарушению технологического процесса. Поэтому и необходимо разработать модель поверхности потока бумажной массы на сетке БДМ.

На рис. 1 приведены фотографии процесса напуска бумажной массы на сетку бумагоделательной машины.

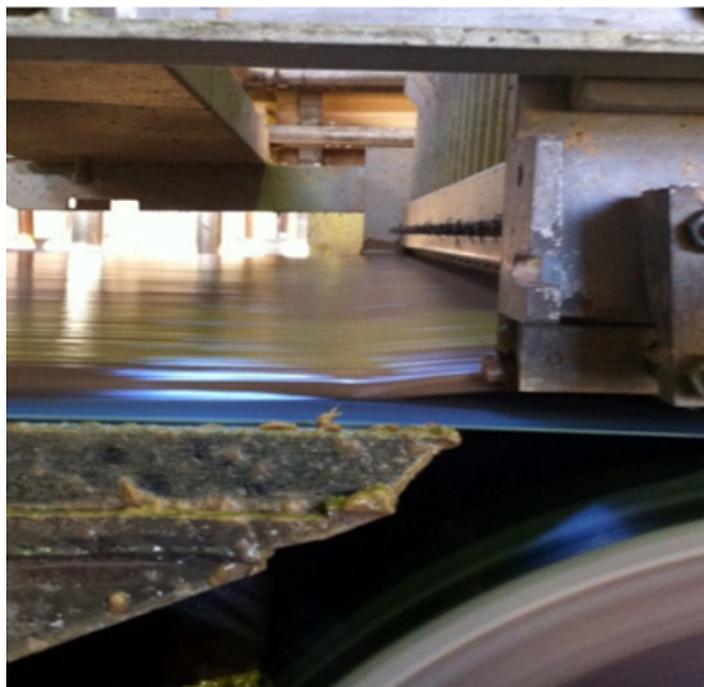


Рис. 1. Процесс напуска массы (вид сбоку)

Моделирование поверхности потока бумажной массы

Моделирование поверхности потока бумажной массы на «мокрой части» БДМ будем проводить в соответствии со следующим алгоритмом:

- видеозапись процесса напуска массы на сетку БДМ, кадрирование видео;
- формирование расчетных областей, поиск координат максимума кросскорреляционной функции, расчет скорости и направления движения потока жидкости [7, 8];
- формирование данных об изменении яркости набора пикселей (каждой точки потока) во времени на основании информации о скорости и направлении движения потока жидкости (рис. 2);

- выделение низкочастотной (при наличии) и высокочастотной составляющих сигнала с помощью метода SVD-разложения;
- моделирование низкочастотной и высокочастотной составляющих сигнала.

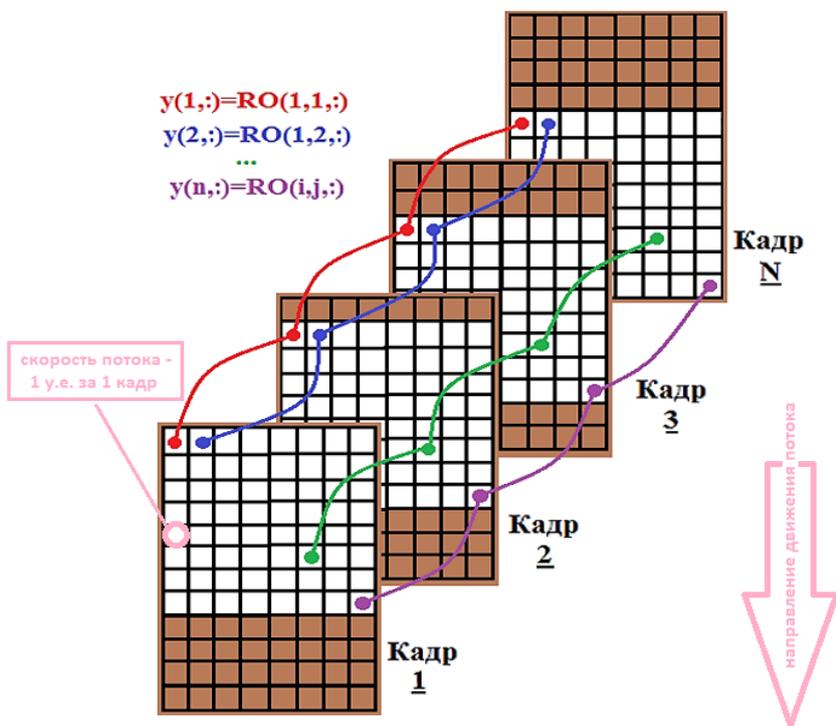


Рис. 2. Принцип формирования данных об яркости пикселей

Большинство этапов алгоритма подробно рассмотрено в работах [8–10], поэтому остановимся на шагах выделения и моделирования низкочастотной и высокочастотной составляющих. Пример изменения яркости пикселя движущихся точек представлен на рис. 3.

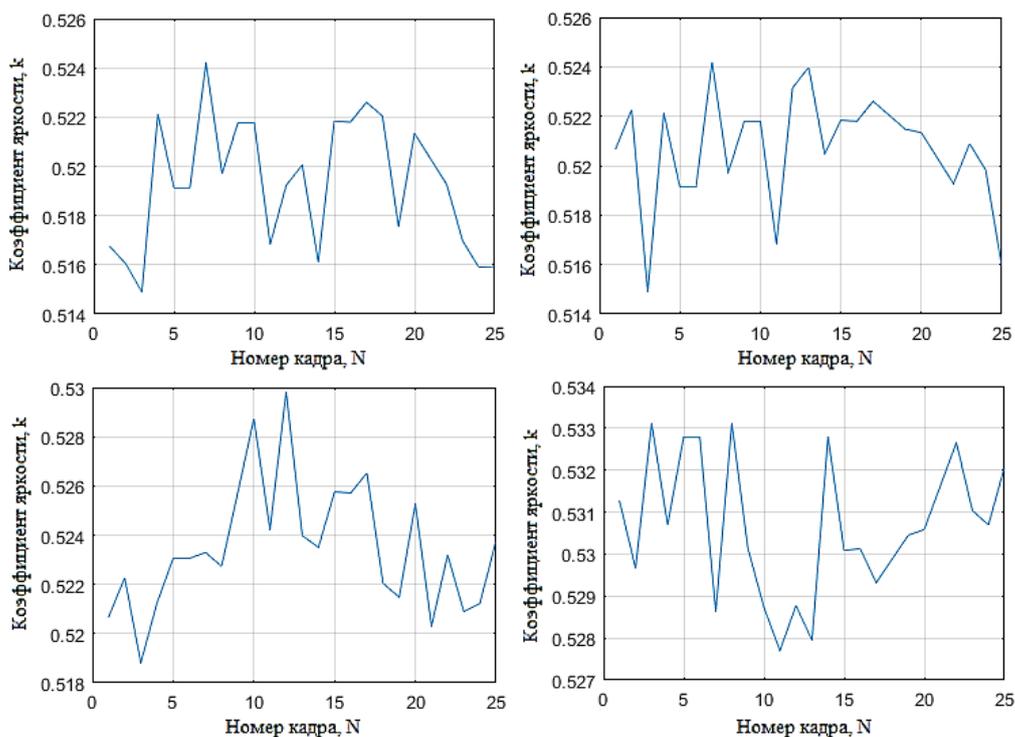


Рис. 3. Примеры изменения яркости пикселя четырех движущихся точек на отслеживаемой области

Выделим низкочастотную и высокочастотную составляющие сигналов с помощью метода SVD-разложения. Алгоритм состоит из четырех шагов: вложение, сингулярное разложение, диагональное усреднение и группировка. Первые два шага в совокупности называются разложением, последние – восстановлением.

На рис. 4 в качестве примера представлены собственные векторы для данных об изменении яркости пикселя с индексом RO (42,36,:), а на рис. 5 – результирующая высокочастотная составляющая (так как сигнал не имеет тренда). В ходе обработки данных была выделена и удалена периодическая составляющая сигнала, обусловленная пульсацией света осветительных приборов.

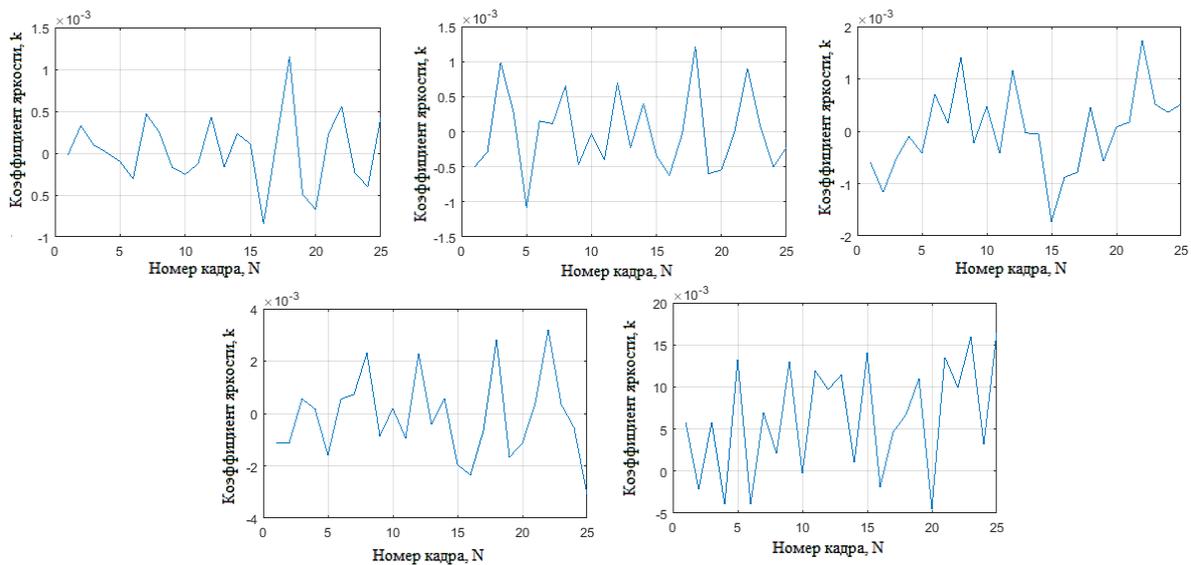


Рис. 4. Собственные векторы для данных об изменении яркости пикселя с индексом RO (42,36,:)

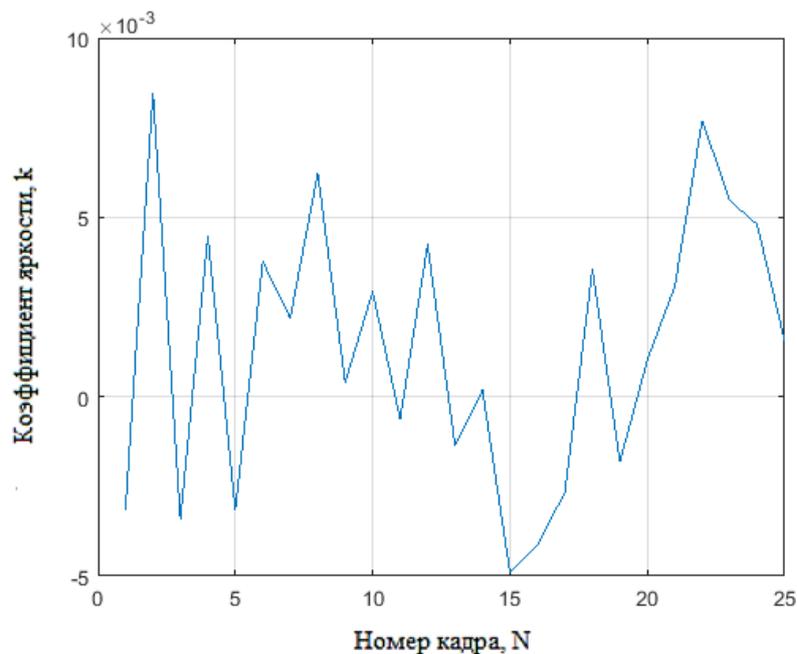


Рис. 5. Пример высокочастотной составляющей сигнала

Моделирование высокочастотной составляющей предлагается осуществить с помощью метода формирующих фильтров [11, 12]. Пример результата работы метода представлен на рис. 6.

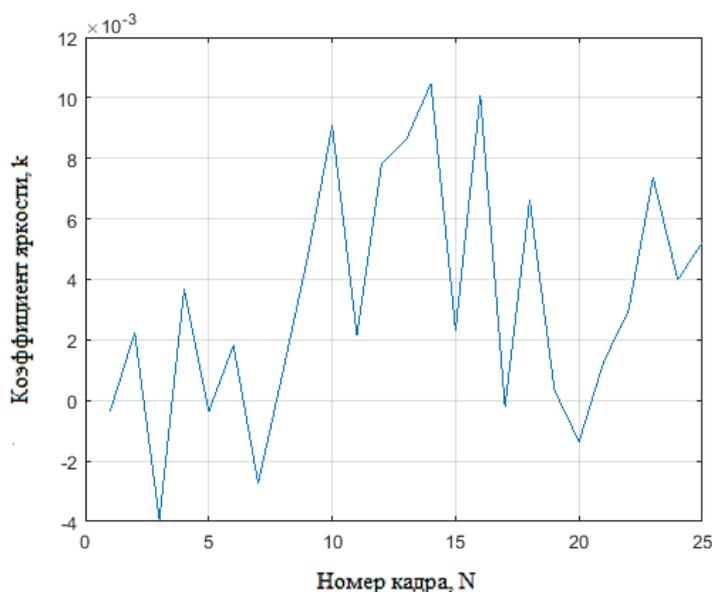
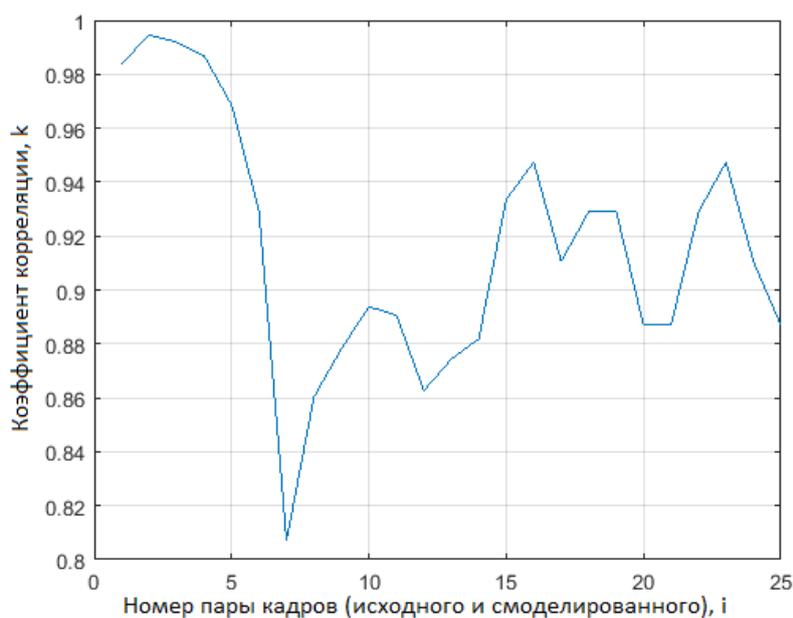


Рис. 6. Пример смоделированной высокочастотной составляющей

Применение метода формирующих фильтров позволяет сформировать новый сигнал изменения яркости каждого пикселя изображения на всех кадрах, т.е., другими словами, позволяет получить полную модель поверхности бумажной массы на сеточной части БДМ. Это необходимо для того, чтобы оценить диапазон измерения скорости напуска бумажной массы на сетку с помощью кросскорреляционного алгоритма и другие наиболее важные параметры, не прибегая к проведению экспериментов на реальном оборудовании.

Для подтверждения корректности модели поверхности бумажной массы на сеточной части БДМ был проведен ранговый тест Вилкоксона на равенство медиан двух независимых выборок. По завершении теста была принята нулевая гипотеза, состоящая в том, что независимые выборки x_i (исходные выборки) и y_i (смоделированные выборки) взяты из генеральных совокупностей с равными медианами.

Кроме того, была проведена оценка коэффициента корреляции между исходными и смоделированными кадрами, позволяющая проанализировать статистическую взаимосвязь между ними (рис. 7).

Рис. 7. График изменения коэффициента корреляции k

Примеры изображений поверхности бумажной массы, полученных с помощью модели, представлены на рис. 8.

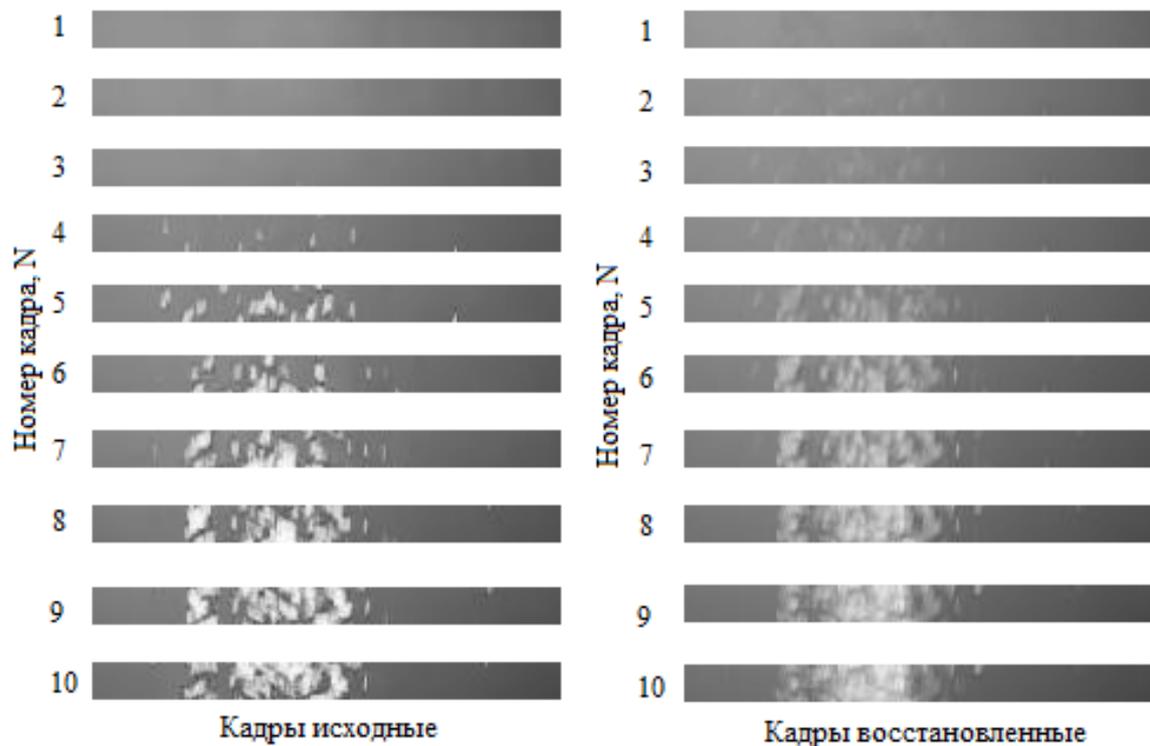


Рис. 8. Примеры изображений поверхности бумажной массы

Синтез изображения потока бумажной массы

Модель поверхности бумажной массы, сформированная в предыдущем разделе, представляет из себя прямоугольные кадры. Результат расчета скорости потока бумажной массы по смоделированным кадрам представлен на рис. 9. Из рисунка видно, что значения скорости потока бумажной массы, полученные при оценке исходных и смоделированных кадров, совпадают, т.е. можно говорить о применимости моделей поверхности бумажного полотна на сеточной части БДМ при оценке основных параметров кросскорреляционного измерителя скорости. Сводные данные по бесконтактному оптическому измерителю скорости потока бумажной массы представлены в табл. 1.

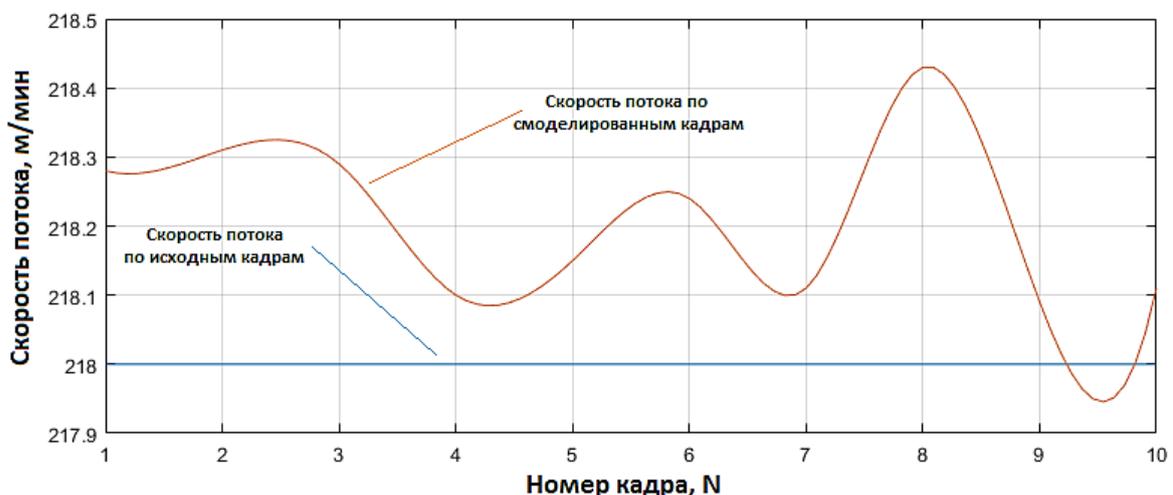


Рис. 9. Скорость потока бумажной массы по смоделированным кадрам

Таблица 1

Основные характеристики бесконтактного измерителя скорости на базе модифицированного кросскорреляционного алгоритма и камеры Canon EOS 600D, полученные при обработке моделей потока бумажной массы с разной скоростью истечения

Показатель	Реальное значение	Требуемое значение
Диапазон измерений	$\approx 0,1 - 20$ м/с	$\approx 0,5 - 15$ м/с*
Погрешность измерений	$\approx 0,25$ %	$\approx 0,35$ %**
Быстродействие вычислений	≈ 240 измерений в 1 с	≈ 240 измерений в 1 с***

Примечания. * скорость на реальных длинносеточных БДМ варьируется в диапазоне от 120 до 900 м/мин; ** погрешность измерения будет оцениваться по наименее точному устройству в системе – энкодеру; *** быстродействие вычислений напрямую зависит от кадровой частоты камеры и при необходимости может быть увеличено за счет использования другого оборудования.

Библиографический список

1. Фляте, Д. М. Свойства бумаги : учеб. пособие / Д. М. Фляте. – Краснодар : Лань, 2012. – 384 с.
2. Иванов, С. Н. Технология бумаги / С. Н. Иванов. – Москва : Школа бумаги, 2006. – 697 с.
3. Зорин, И. Ф. Управление процессами целлюлозно-бумажного производства / И. Ф. Зорин, В. П. Петров, С. А. Рогольская. – Москва : Лесная промышленность, 2008. – 272 с.
4. Ревунов, М. С. Совершенствование систем стабилизации параметров потока бумажной массы с использованием кросскорреляционного алгоритма / М. С. Ревунов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 24–31.
5. Котюк, А. Ф. Датчики в современных измерениях / А. Ф. Котюк. – Москва : Мир, 2007. – 48 с.
6. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ : справочник / П. П. Кремлевский ; под общ. ред. Е. А. Шорникова. – 5-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Политехника, 2004. – Кн. 2. – 412 с.
7. Прэтт, У. Н. Цифровая обработка изображений / У. Н. Прэтт. – Москва : Мир, 2000. – 312 с.
8. Токарев, М. П. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости / М. П. Токарев, Д. М. Маркович, А. В. Бильский // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12, № 3. – Р. 109–131.
9. Ревунов, М. С. Повышение точности кросскорреляционного метода измерения скорости путем эквализации расчетной области / М. С. Ревунов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 30–37.
10. Артамонов, Д. В. Анализ спекловой картины для разработки алгоритма автоматической настройки оптических систем / Д. В. Артамонов, А. Д. Семенов, А. В. Костюнин, И. В. Куприянов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2 (42). – С. 42–54.
11. Хемминг, Р. В. Цифровые фильтры / Р. В. Хемминг. – Москва : Советское радио, 1980. – 112 с.
12. Солодовников, В. В. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования / В. В. Солодовников. – Москва : Машиностроение, 2002. – 773 с.

References

1. Flyate D. M. *Svoystva bumagi: ucheb. posobie* [Properties of paper: textbook. stipend]. Krasnodar: Lan', 2012, 384 p. [In Russian]
2. Ivanov S. N. *Tekhnologiya bumagi* [Paper technology]. Moscow: Shkola bumagi, 2006, 697 p. [In Russian]
3. Zorin I. F., Petrov V. P., Rogul'skaya C. A. *Upravlenie protsessami tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva* [Management of pulp and paper production processes]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 2008, 272 p. [In Russian]
4. Revunov M. S. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 4 (26), pp. 24–31. [In Russian]
5. Kotyuk A. F. *Datchiki v sovremennykh izmereniyakh* [Sensors in modern measurements]. Moscow: Mir, 2007, 48 p. [In Russian]
6. Kremlevskiy P. P. *Raskhodometry i schetchiki kolichestva veshchestv: spravochnik* [Flow meters and counters number of substances : reference]. 5th ed., rev. and suppl. Saint-Petersburg: Politekhnik, 2004, bk. 2, 412 p. [In Russian]
7. Prett U. N. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital image processing]. Moscow: Mir, 2000, 312 p. [In Russian]

8. Tokarev M. P., Markovich D. M., Bil'skiy A. V. *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computing technology]. 2007, vol. 12, no. 3, pp. 109–131. [In Russian]
9. Revunov M. S. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2019, no. 2 (28), pp. 30–37. [In Russian]
10. Artamonov D. V., Semenov A. D., Kostyunin A. V., Kupriyanov I. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [News of higher educational institutions. Volga region. Technical science]. 2017, no. 2 (42), pp. 42–54. [In Russian]
11. Khemming R. V. *Tsifrovye fil'try* [Digital filter]. Moscow: Sovetskoe radio, 1980, 112 p. [In Russian]
12. Solodovnikov V. V. *Tekhnicheskaya kibernetika. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya* [Technical cybernetics. The theory of automatic control]. Moscow: Mashinostroenie, 2002, 773 p. [In Russian]

Ревунов Максим Сергеевич

аспирант,
 Пензенский государственный университет
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
 инженер отдела автоматизированных систем
 управления технологическими процессами,
 ОАО «Маяк»
 (Россия, г. Пенза, ул. Бумажников, 1)
 E-mail: revunov_rabota@mail.ru

Revunov Maksim Sergeevich

postgraduate student,
 Penza State University
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia);
 engineer of automated system
 process control department,
 JSC «Mayak»
 (1 Bumaznikov street, Penza, Russia)

Салмов Евгений Николаевич

кандидат технических наук,
 ведущий инженер-программист отдела
 автоматизированной системы
 управления технологическими процессами,
 ОАО «Маяк»
 (Россия, г. Пенза, ул. Бумажников, 1)
 E-mail: salmove@mail.ru

Salmov Evgeniy Nikolaevich

candidate of technical sciences,
 leading software engineer of automated system
 process control department,
 JSC «Mayak»
 (1 Bumaznikov street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Ревунов, М. С. Моделирование поверхности потока бумажной массы на сетке бумагоделательной машины / М. С. Ревунов, Е. Н. Салмов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 1 (31). – С. 43–50. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-6.

Р. Р. Акчурин, А. А. Трофимов

ВИХРЕВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ОБЪЕМНОГО И МАССОВОГО РАСХОДА ЖИДКОСТИ

R. R. Aktchurin, A. A. Trofimov

VORTEX MEASURER OF MASS AND VOLUMETRIC FLOW RATE

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Использование современных методов компьютерного анализа позволяет предварительно оценить работоспособность того или иного метода в кратчайшие сроки, отсеять нерациональные варианты и приступить к разработке будущего изделия. Объектом исследования является вихревой волоконно-оптический измеритель расхода, в котором чувствительными элементами являются решетки Брэгга. **Материалы и методы.** При решении поставленных задач использованы методы интегрального и дифференциального исчисления, математического моделирования, метод конечных элементов, теории механики деформируемого тела. При проектировании конструкции датчиков применялись системы автоматизированного проектирования КОМПАС, SolidWorksSimulation и Ansys. Предложена функциональная схема измерительного преобразователя, измеряющего массовый и объемный расходы, а также плотность жидкой или газовой среды. **Результаты.** В результате моделирования процессов вихреобразования определены конструктивные параметры тела обтекания и деформационного фрагмента. Получены значения частот колебаний деформационного фрагмента, зависящих от объемного расхода и плотности среды. **Выводы.** Установленные в результате исследования значения сил, действующих на деформационный фрагмент, позволили оценить значение его деформаций и необходимого уровня чувствительности.

A b s t r a c t. Background. Using the modern methods of computer analysis prior to a fabrication allows to evaluate, as soon as possible, if one of the methods is efficient or no, to delete unpractical variants and begin to develop a future device. The research object is the vortex fiber-optic measurer of flow rate with Bragg arrays used there as the sensing elements. **Materials and methods.** The following methods were using during the objective researching: integral and differential calculus, mathematical simulation, finite element method, mechanic theory of the deformed body. During the sensors construction designing were using such CAD-systems like COMPAS, SolidWorksSimulation and Ansys. A functional scheme of the measurement transducer for a measuring of mass and volumetric flow rate as well as a density of a liquid and gaseous medium was proposed. **Results.** As a result of the vortex formation processes simulation design factors of a flow body and deformation fragment were detected. Oscillation frequency values of the deformation fragment depending on the volumetric flow rate and media density were obtained. **Conclusions.** The force values, influenced on the deformation fragment, which were detected as a result of the research made it possible to evaluate a value of its deformation and necessary sensitivity level.

К л ю ч е в ы е с л о в а: вихревой расходомер, тело обтекания, частота срыва вихрей, вихревая дорожка Кармана.

К e y w o r d s: vortex flowmeter, bluff body, frequency of failure whirlwinds, vortex path of the Karman.

Принцип действия вихревых измерителей объемного расхода заключается в преобразовании поступательного движения жидкой или газообразной среды в вихревое с последующим измерением частоты срыва вихрей [1]. В вихревых преобразователях массового расхода дополнительно измеряется частота собственных механических колебаний деформационного фрагмента [2]. Первичный измерительный преобразователь содержит тело обтекания (вихреобразователь), расположенное поперек потока, также деформационный фрагмент, на котором расположены чувствительные элементы, один из которых преобразовывает энергию вихревого движения в частотный электрический сигнал, при этом частота образования вихрей прямо пропорциональна объемному расходу среды. Частотный сигнал с другого чувствительного элемента равен частоте собственных колебаний деформационного элемента, которая зависит от плотности среды, в которой он находится [3].

Важнейшим компонентом вихревых расходомеров являются преобразователи энергии вихревого движения жидкости или газа в информационный сигнал, где применяются пьезоэлектрические, акустические, емкостные, индуктивные, анемометрические, оптоэлектронные, волоконно-оптические чувствительные элементы [3–7].

Использование в качестве чувствительного элемента волоконно-оптической деформационной решетки Брэгга перспективно в силу следующих причин:

- возможностью передачи энергии излучения и информационного сигнала по одному оптическому волокну на достаточно большие расстояния (к первичному измерительному преобразователю подходит только оптическое волокно);
- возможность конструктивной интеграции решетки в структуру деформационного фрагмента;
- высокая чувствительность к деформациям и незначительная постоянная времени решетки;
- возможность использования решеток в контакте с горючими смесями, что обеспечивает пожарную безопасность и взрывобезопасность;
- отсутствие чувствительности к электромагнитным воздействиям;
- относительно высокая химическая стойкость.

Частота вихреобразования связана с объемным расходом следующим соотношением [1–3]:

$$f = \frac{Sh \cdot Q}{\alpha \left(\frac{\pi}{4} - \alpha \right) D^3}, \quad (1)$$

где f – частота вихреобразования, Гц; D – диаметр проточной части, мм; α – отношение фронтальной ширины тела обтекания к диаметру; Sh – число Струхалия; Q – объемный расход, м³/с.

В свою очередь из теории подобия [8] вытекает, что число Струхалия Sh является функцией числа Рейнольдса Re :

$$Re = \frac{DV}{\nu}, \quad (2)$$

где V – средняя скорость потока, м/с; ν – кинематическая вязкость контролируемой жидкости, являющаяся функцией температуры, м²/с.

Из формул (1) и (2) следует, что одному и тому же расходу могут соответствовать разные значения Re , что является источником систематической погрешности. Кроме того, зависимость $Sh = f(Re)$ не линейна даже при фиксированной вязкости ν . Для того, чтобы обеспечить необходимую допустимую систематическую погрешность в широком диапазоне значений Q и V , необходимо учитывать нелинейность зависимости $Sh = f(Re)$, а также ввести коррекцию показаний на изменение вязкости ν .

В качестве деформационного фрагмента в работе используется конструкция типа «хвост» [9].

На сегодняшний день существует несколько способов, основанных на построении модели и способных дать адекватное представление об исследуемой системе. Такие способы принято называть способами моделирования. При всем многообразии способов рассматриваемого теории моделирования можно выделить две группы: аналитическое и имитационное модели-

рование. Аналитическое моделирование заключается в построении модели, основанной на описании поведения объекта или системы объектов в виде аналитических выражений – формул. При таком моделировании объект описывается системой линейных или нелинейных алгебраических или дифференциальных уравнений, решение которых может дать представление о свойствах объекта. К полученной аналитической модели с учетом вида и сложности формул применяются аналитические или приближенные численные методы. Применение аналитического моделирования ограничено сложностью получения и анализа выражений для больших систем. Имитационное же моделирование предполагает построение модели с характеристиками, адекватными оригиналу, на основе физического или информационного принципа. Это означает, что внешние воздействия на модель и объект вызывают идентичные изменения свойств оригинала и модели. При таком моделировании отсутствует общая аналитическая модель большой размерности, а объект представлен системой, состоящей из элементов, взаимодействующих между собой и с внешним миром. Задавая внешние воздействия, можно получить характеристики системы и провести их анализ. В последнее время имитационное моделирование все больше ассоциируется с моделированием объектов на компьютере, что позволяет в интерактивном режиме исследовать модели самых разных по природе объектов.

При имитационном моделировании расходомера воспроизводится алгоритм функционирования системы во времени – поведение системы; причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания, что позволяет по исходным данным получить дающие возможность оценить характеристики системы сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени. Основным преимуществом имитационного моделирования является возможность решения сложных задач. Имитационные же модели позволяют достаточно просто учитывать такие факторы, как наличие дискретных и непрерывных элементов, нелинейные характеристики элементов системы, многочисленные случайные и другие воздействия, которые часто создают трудности при аналитических исследованиях.

В настоящее время имитационное моделирование не только наиболее эффективный метод исследования систем, а часто единственный, практически доступный метод получения информации о поведении системы.

Для определения конструктивных параметров деформационного фрагмента проведено компьютерное моделирование в программных пакетах SolidWorks (модуль FlowSimulation) и ANSYS. Конструктивные параметры обеспечивают наличие ослабленного турбулентного режима, что позволяет судить о снижении потерь давления на участке вихреобразования, а также кинетической энергии отдельных слоев измеряемой среды. Деформационный фрагмент колеблется под воздействием скоростного напора, и его функционирование не зависит от физических характеристик жидкости. Соответствие размеров «хвоста» размерам вихря обеспечивает интегрирующий эффект и, как следствие, высокое отношение «сигнал/шум». Моделирование проводилось при следующих условиях: $D_y = 50$ мм; объемный расход $Q = 1,3 \dots 60$ м³/ч; начальная скорость ламинарного потока (при $Q = 60$ м³/ч) $V = 8,8$ м/с; динамическая вязкость $\eta = 0,025$ Па·с; плотность НП $\rho = 750$ кг/м³; температура НП $T = 40$ °С. Конструктивные параметры деформационного фрагмента «хвоста»: плотность материала пластины $\rho_{пл.} = 7700$ кг/м³; длина $L = 40$ мм; ширина $G = 20$ мм; толщина $K = 4$ мм.

По результатам измерения массовый расход вычисляется в соответствии с зависимостью [9]

$$Q_M = \rho Q, \quad (3)$$

где Q_M – массовый расход, кг/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

В процессе компьютерного моделирования построены эпюры и графики: эпюры скоростей и давления; зависимость воздействия силы на деформационный фрагмент «хвост» от времени; зависимость воздействия силы на чувствительный элемент (ЧЭ) от времени; модели, описывающей деформацию, как деформационного фрагмента, так и ЧЭ; результаты моделирования собственных колебаний деформационного фрагмента в вакууме.

Эпюры на рис. 1 представляют собой интерпретацию скоростей и давлений, образующихся за телом обтекания вдоль деформационного фрагмента «хвоста» в результате воздей-

ствия потока на него. Третья эпора (рис. 2) является фрагментом вида слева и соответствует боковой стороне «хвоста».

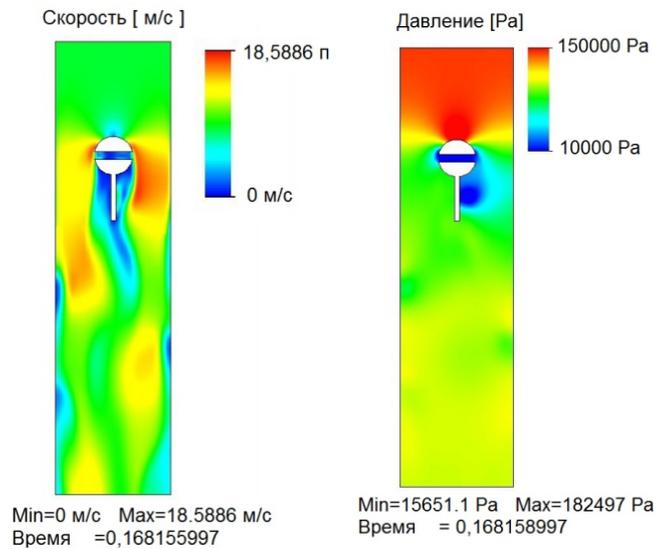


Рис. 1. Эпоры скоростей и давлений

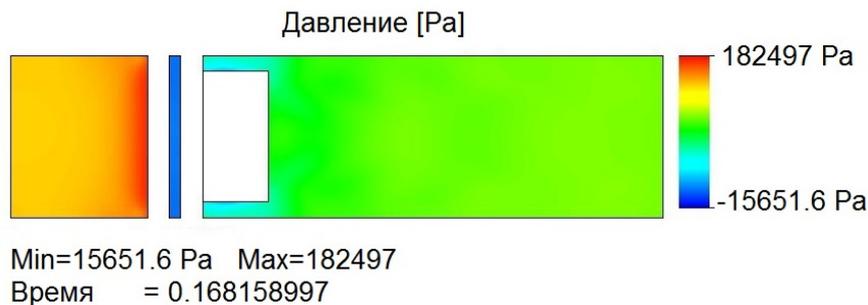


Рис. 2. Эпора давлений (вид слева)

При анализе можно сделать вывод о том, что развитый турбулентный режим не устанавливается. Это происходит вследствие наличия «хвоста» (эффект присоединения массы) [9], препятствующего конечному образованию вихрей, что и предусмотрено конструкцией. Данный факт является несомненным преимуществом, так как жидкость, протекающая в условиях переходного турбулентного режима, имеет меньшие потери кинетической энергии на характерной длине вихреобразования по сравнению с развитым турбулентным режимом. Снижается потеря давления при прохождении жидкости через вихреобразователь, т.е. стабилизация потока жидкости (переход ее обратно в ламинарный поток) происходит за более короткое время и на более коротком участке трубопровода.

Эпора давлений показывает воздействие отдельных вихрей на разные стороны хвоста, что обусловлено природой явления образования дорожек Кармана, в частности их цикличностью и периодичностью [1–3]. Поскольку момент времени был выбран статично, то и давление показано на эпоре всего на одной плоскости и составляет порядка 70 кПа. Передняя часть вихреобразователя принимает удар ламинарного потока, вследствие чего давление потока жидкости, оказываемое на фрагмент, существенно повышается. Увеличение давления ближе к основанию показанной части вызвано сложными гидромеханическими процессами и объясняется приближением слоев жидкости к «точке отрыва вихрей». В результате моделирования и на основании эпоры давлений и заданных конструктивных параметров «хвоста» был получен график зависимости периодической силы, действующей на «хвост» (силы Кармана) от времени (рис. 3).

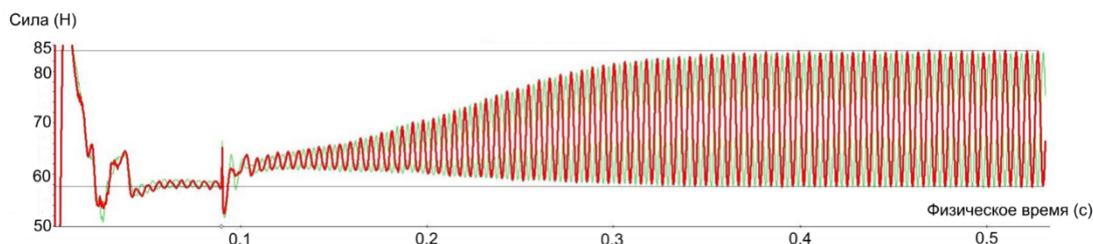


Рис. 3. Зависимость силы Кармана, действующей на деформационный фрагмент, от времени

Из графика видно, что в момент времени 120 мс начинает развиваться турбулентный режим и появляется периодическая сила Кармана, достигающая установившегося значения амплитуды в момент времени 350 мс, что позволяет получить значение силы в нижней и верхней точке амплитуды соответственно 58 и 85 Н.

На рис. 4 приведен график зависимости деформирующей силы Кармана от времени относительно ЧЭ.

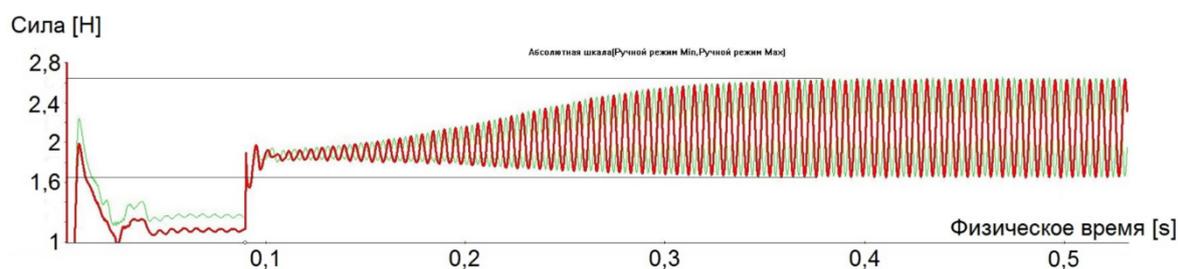


Рис. 4. Зависимость силы Кармана, действующей на ЧЭ, от времени

Процесс вихреобразования симметричен процессу воздействия на «хвост», однако диапазон сил меняется: 1,6...2,6 Н. В соответствии с графиком частота вихреобразования f определяется выражением

$$f = \frac{n}{\Delta t}, \quad (4)$$

где n – количество периодов за время Δt ; Δt – выбранный диапазон времени, мс.

Результаты моделирования деформации «хвоста» (деформационного фрагмента) в зоне установки чувствительного элемента приведены на рис. 5.

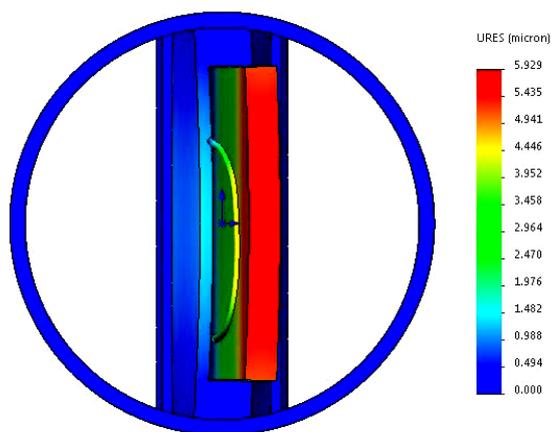


Рис. 5. Результаты моделирования деформации «хвоста» (деформационного фрагмента)

Из рисунка видно, максимальная деформация «хвоста» на отдельных участках составляет до 6 мкм. Используя первичный преобразователь с чувствительностью не хуже 1,4 пм/мг,

можно легко получить периодические колебания резонансной длины волны λ_c , необходимые для измерения объемного расхода (рис. 6).

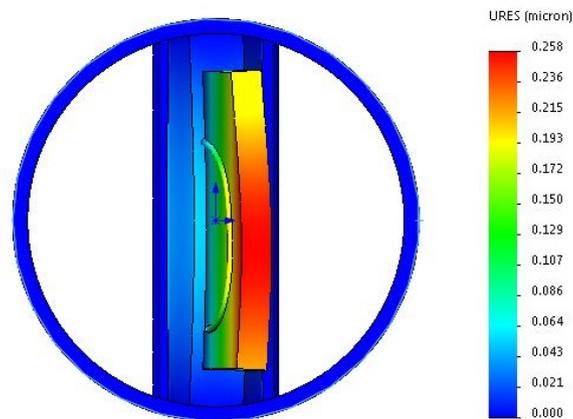


Рис. 6. Результаты моделирования деформации ЧЭ

При моделировании собственных колебаний деформационного фрагмента «хвоста» (рис. 7) в зоне установки ЧЭ, отвечающего за измерение плотности, деформация составила 0,2 мкм, что также достаточно для измерения плотности с чувствительностью не хуже 1,4 пм/мг, а частота собственных колебаний деформационного элемента $f = 4572$ Гц.

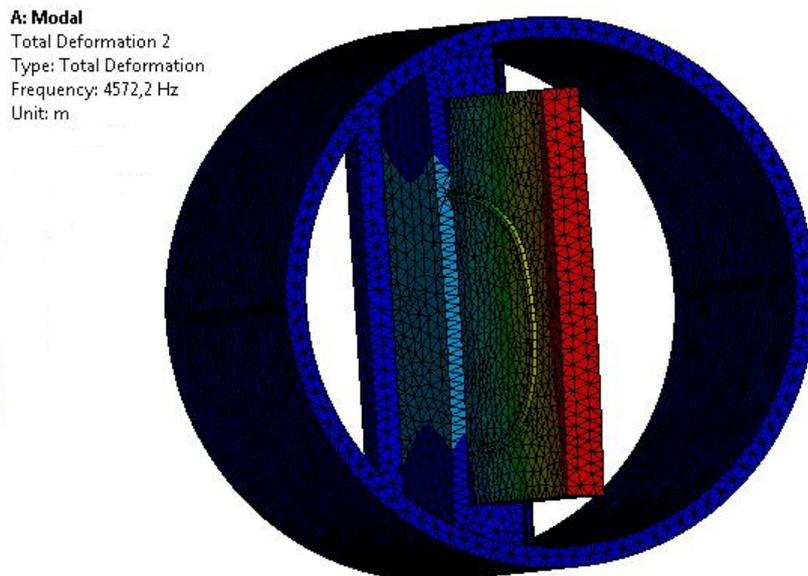


Рис. 7. Модель собственных колебаний деформационного фрагмента в вакууме

Зависимость частоты собственных колебаний f от конструктивных параметров деформационного фрагмента «хвост» определяется выражением [8]

$$f = \frac{C^2}{2\pi G^2} \sqrt{\frac{EI_{\text{ЧЭ}}}{\mu}}, \quad (5)$$

где C – постоянная, зависящая от конструктивных особенностей вихреобразователя; G – ширина деформационного фрагмента (ДФ), мм; L – длина ДФ, мм; E – модуль Юнга ЧЭ, Па; $I_{\text{ДФ}}$ – момент инерции второго порядка ДФ, $\text{кг}\cdot\text{м}^3$; μ – масса на единицу длины ДФ, кг/м.

Из формулы (5) следует, что частота собственных колебаний изменяется при изменении плотности текучей среды (эффект «присоединенной массы»). Упругая часть ЧЭ вихреобразующего элемента вызывает ускорение части окружающей среды, что приводит к уменьшению частоты собственных колебаний.

Заключение

Разработан измеритель массового и объемного расхода, а также плотности жидкой или газовой среды. В результате моделирования процессов вихреобразования определены конструктивные параметры тела обтекания и деформационного фрагмента. Получены значения частот колебаний деформационного фрагмента, зависящих от объемного расхода и плотности среды. На основе этих данных выбраны полосы пропускания фильтров нижних и верхних частот. Установленные в результате исследования значения сил, действующих на деформационный фрагмент, позволили оценить значение его деформаций и необходимого уровня чувствительности.

Библиографический список

1. *Кремлевский, П. П.* Расходомеры и счетчики количества веществ / П. П. Кремлевский. – Ленинград : Машиностроение, 1989. – 701 с.
2. *Киясбейли, А. Ш.* Вихревые измерительные приборы / А. Ш. Киясбейли, М. Е. Перельштейн. – Москва : Машиностроение, 1978. – 152 с.
3. *Киясбейли, А. Ш.* Вихревые счетчики – расходомеры / А. Ш. Киясбейли, М. Е. Перельштейн. – Москва : Машиностроение, 1974. – 160 с.
4. *Кратиров, Д. В.* Измерение расхода вихревым расходомером в условиях неравномерности потоков / Д. В. Кратиров, В. М. Мекешкин, Н. И. Михеев, В. М. Молочников // Материалы докладов национальной конференции по теплоэнергетике НКТЕ. – Казань, 2006. – С. 121–124.
5. Вихревые расходомеры DY (digitalYEWFLOW) и YF100 (YEWFLOW). – Москва : ЗАО «Техносистемы», 2007. – URL: tehnosystems.ru/katalog.php?id=27
6. *Акчурин, Р. Р.* Вихревой измеритель массового и объемного расхода на волоконно-оптических решетках Брэгга / Р. Р. Акчурин, В. А. Соловьев, А. С. Баранов // Вестник Пензенского государственного университета. – 2017. – № 3 (19). – С. 76–83.
7. *Баранов, А. С.* К вопросу о выборе метода измерения массового расхода криогенных жидкостей при проектировании расходомеров / А. С. Баранов, М. А. Фролов, А. А. Трофимов // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 2 (12). – С. 19–27.
8. *Седов, Л. И.* Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – Москва : Наука, 1967. – С. 71–76.
9. Устройство, выполненное с возможностью детектирования физической величины движущейся текучей среды, и соответствующий способ. – URL: <http://www.findpatent.ru/patent/255/2555206.html>. с экрана (дата обращения: 06.05.2017).
10. *Башта, Т. М.* Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1982. – 424 с.

References

1. Kremlevskiy P. P. *Raskhodometry i schetchiki kolichestva veshchestv* [Flow meters and counters number of substances]. Leningrad: Mashinostroenie, 1989, 701 p. [In Russian]
2. Kiyasbeyli A. Sh., Perel'shteyn M. E. *Vikhreyye izmeritel'nyye pribory* [Vortex measuring devices]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 152 p. [In Russian]
3. Kiyasbeyli A. Sh., Perel'shteyn M. E. *Vikhreyye schetchiki – raskhodometry* [Vortex flow meters]. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 160 p. [In Russian]
4. Kratirov D. V., Mekeshkin V. M., Mikheev N. I., Molochnikov V. M. *Materialy dokladov natsional'noy konferentsii po teploenergetike NKTE* [Materials of reports of the national conference on heat power NCTE]. Kazan, 2006, pp. 121–124. [In Russian]
5. *Vikhreyye raskhodometry DY (digitalYEWFLOW) i YF100 (YEWFLOW)* [Vortex flow meters DY (digitalYEWFLOW) and YF100 (YEWFLOW)]. Moscow: ZAO «Tekhnosistemy», 2007. Available at: tehnosystems.ru/katalog.php?id=27 [In Russian]
6. Akchurin R. R., Solov'ev V. A., Baranov A. S. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Penza State University]. 2017, no. 3 (19), pp. 76–83. [In Russian]
7. Baranov A. S., Frolov M. A., Trofimov A. A. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurements. Monitoring. Management. Control]. 2015, no. 2 (12), pp. 19–27. [In Russian]
8. Sedov L. I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* [Similarity and dimensionality methods in mechanics]. Moscow: Nauka, 1967, pp. 71–76. [In Russian]
9. *Ustroystvo, vypolnennoe s vozmozhnost'yu detektirovaniya fizicheskoy velichiny dvizhushcheyasya tekuchey sredy, i sootvetstvennyy sposob* [A device designed to detect the physical quantity of a moving flu-

id, and the corresponding method]. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/255/2555206.html>. s ekrana (accessed May 06, 2017). [In Russian]

10. Bashta T. M., Rudnev S. S., Nekrasov B. B. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody* [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. 2nd ed., rev. and suppl. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 424 p. [In Russian]

Акчурин Роман Ринатович

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Akchurin Roman Rinatovich

mastergraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya 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 Aleksey Anatol'evich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information
and measurement technology and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Акчурин, Р. Р. Вихревой измеритель объемного и массового расхода жидкости / Р. Р. Акчурин, А. А. Трофимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 1 (31). – С. 51–58. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-7.

В. С. Ратушняк

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЛЕД, НАМОРОЖЕННЫЙ НА ПРОВОД ЛЭП

V. S. Ratushnyak

RESULTS OF AN EXPERIMENTAL STUDY OF IMPACT ON ICE, FROZEN ON POWER LINES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. При решении задачи освобождения ЛЭП от обледенения механическим стряхиванием может быть использовано явление хрупкости льда при высоких скоростях нагружения. Объектом исследования является трубка льда, намороженная на провод ЛЭП. Целью работы является выявление зависимости энергии, необходимой для разрушения льда, от скорости удара и проверка предположения о том, что при увеличении скорости динамического воздействия на разрушение льда требуется меньше энергии. **Материалы и методы.** Исследование выполнено с применением разработанной лабораторной установки. Удары по отбойнику, закрепленному непосредственно на проводе до начала обледенения, совершались с помощью маятника длиной 2 м со сменной массой груза. **Результаты.** Сформулирован критерий, позволяющий однозначно определить параметры удара, необходимого для разрушения льда. Приведены зависимости запасенной и переданной энергии от скорости ударяющего тела с учетом того, что удар является частично упругим. **Выводы.** Подтверждено предположение о снижении энергии, необходимой для образования трещин и стряхивания льда при увеличении скорости динамического воздействия по отбойнику, закрепленному непосредственно на проводе.

A b s t r a c t. Background. When solving the problem of freeing power lines from icing by mechanical shaking, the phenomenon of ice brittleness at high loading speeds can be used. The object of study is an ice tube frozen on a power line wire. The aim of this work is to identify the dependence of the energy required for ice destruction on the speed of impact and to verify the assumption that with an increase in the speed of the dynamic effect on ice destruction, less energy is required. **Materials and methods.** The study was performed using the developed laboratory setup. The blows on the chipper fixed directly to the wire before the icing began were carried out using a pendulum 2 m long with a removable mass of cargo. **Results.** A criterion is formulated that makes it possible to uniquely determine the parameters of the impact necessary for the destruction of ice. The dependences of the stored and transferred energy on the velocity of the striking body are given, taking into account that the shock is not completely elastic. **Conclusions.** The assumption of a decrease in the energy required for the formation of cracks and shaking off of ice with an increase in the speed of dynamic action along the chipper fixed directly to the wire is confirmed.

К л ю ч е в ы е с л о в а: обледенение проводов ЛЭП, хрупкое разрушение льда, энергия для разрушения льда, критерий разрушения, частично упругий удар.

K e y w o r d s: icing of power line wires, brittle destruction of ice, energy for ice destruction, destruction criterion, partially elastic impact.

Проблема образования льда на конструкциях, сооружениях, дорожных покрытиях и поиск способов борьбы с этим природным явлением привели к тому, что на сегодняшний день накоплены обширные знания, подкрепленные теоретическими и экспериментальными исследованиями в области физико-механических характеристик льда, а также характера, параметров и условий его деформации. Известно, что на разрушение льда влияют такие факторы, как температура, наличие сдвиговых напряжений [1], скорость удара [2–4]. Малая скорость нагружения вызывает лишь упругие деформации. При возрастании скорости удара наблюдаются упругопластические деформации, и наконец, наступает хрупкое разрушение [5]. Эксперименты показывают, что прочность льда при хрупком разрушении в 4–6 раз меньше, чем при пластическом [6]. Это объясняется тем, что при медленном воздействии нагрузка успевает распределиться по большему объему льда, за счет чего его номинальная прочность возрастает. Согласно исследованиям [7–12], переход от пластического разрушения льда к хрупкому происходит на скорости деформации около 10^{-3} с^{-1} , а предельная скорость, при которой уже происходит деформация льда, составляет порядка 1 с^{-1} [13].

Среди методов освобождения проводов ЛЭП от ледовых наростов наиболее перспективными считаются те, которые реализуют механическое стряхивание льда [13, 14]. В свою очередь, основным механизмом разрушения льда при низких температурах является образование и распространение хрупких трещин [4]. Опытные данные [15, 16] показывают снижение прочности льда при увеличении скорости деформации при хрупком разрушении. Физически это объясняется нехваткой времени для развития зоны вязко-пластической деформации и релаксации напряжений в вершинах трещин [17]. Поскольку при хрупком разрушении энергия не рассеивается на пластическую деформацию, следовательно, сокращая время удара, можно снизить энергозатраты на освобождение проводов ЛЭП ото льда. Таким образом, именно высокоскоростное воздействие представляет практический интерес для решения проблемы обледенения проводов ЛЭП, а устройство, способное обеспечивать достаточные скорости удара, может оказаться эффективным.

Авторами статьи ведется разработка устройства [18–22], позволяющего сообщать на провод динамические воздействия задаваемой мощности. Контролируемость параметров удара обеспечит электрическая схема разрядного блока. В связи с этим важнейшей задачей является определение параметров механического импульса, способного преодолеть адгезионные силы льда к проводу. Целью настоящего исследования являлось выявление зависимости энергии, необходимой для разрушения льда от скорости удара и проверка предположения о том, что при увеличении скорости динамического воздействия на разрушение льда требуется меньше энергии.

Определение критерия разрушения льда

В ходе исследования использовалась установка, описанная в работе [23]. На платформе установки закреплялись образцы провода АС120/19 длиной 0,5 м с замороженной трубкой льда двух типов (табл. 1). Концы провода жестко фиксировались и с помощью маятника осуществлялся удар по отбойнику, заранее закрепленному на проводе. Фиксация отбойника до начала обледенения обеспечивала нанесение удара непосредственно на провод. Доступный диапазон высот для поднятия груза – до 2 м. Эксперимент проводился при температуре льда 0°C .

Таблица 1

Типы льда на образцах проводов АС120/19

Тип льда	Длина трубки льда, м	Диаметр льда, мм	Толщина стенки льда, мм	Масса льда, кг	Плотность льда, $\text{кг}/\text{м}^3$
1	0,36	23,5	4,15	0,0867	954,49
2	0,36	33,4	9,1	0,2387	954,49

Критерием разрушения льда было выбрано состояние, при котором лед откалывается от провода в радиусе 5–10 см от отбойника, и энергии хватает на стряхивание отколовшейся

массы льда, при этом на проводе может оставаться тонкая ледяная корка толщиной 1–2 мм. В ходе экспериментов стало известно, что при одной и той же массе груза и высоте поднятия степень разрушения льда может сильно варьироваться: от мелких трещин до полного стряхивания в соответствии с критерием разрушения. В связи с этим критерий разрушения был уточнен оговоркой: энергия груза m , поднятого на высоту h , считается необходимой и достаточной для разрушения ледяной корки диаметром d , если результат отбития соответствует критерию разрушения с вероятностью 50 %. Для проверки соответствия критерию на искомым высотах было проведено по 10 экспериментов. В качестве подтверждения малости диапазона высот, в которых выполняется критерий разрушения, было проведено по 10 экспериментов на соседних высотах, составляющих ± 5 см от найденной высоты. Полученные данные подтвердили предположение о том, что уточненный критерий позволяет однозначно определить параметры удара, необходимого для разрушения льда.

Зависимость массы груза маятника от высоты его поднятия

В результате для обоих типов льда опытным путем определены высоты поднятия четырех грузов с различной массой. Таким образом, получены восемь сценариев разрушения льда (табл. 2).

Таблица 2

Сценарии разрушения льда

Вариант сценария	Тип образца льда	Масса груза, кг	Высота поднятия, м
1	1	0,0910	1,475
2	2		1,775
3	1	0,1095	1,150
4	2		1,400
5	1	0,1580	0,650
6	2		0,875
7	1	0,2225	0,425
8	2		0,600

На рис. 1 приведен график зависимости массы груза от высоты, на которую его необходимо поднять для растрескивания и откалывания льда в соответствии с уточненным критерием разрушения. Данная зависимость носит нелинейный характер для обеих толщин льда и может быть аппроксимирована логарифмическим уравнением.

На рис. 2 приведены фотографии характерных результатов удара по отбойнику, соответствующих выбранному критерию отбития для каждого из сценариев разрушения льда.

Определение зависимости запасенной и переданной энергии от скорости удара

Когда маятник в нижней точке ударяется об отбойник, проводу передается только часть энергии. В предыдущей статье [23] для упрощения расчетов мы считали удар маятника по отбойнику приближенным к абсолютно упругому. Однако за счет диссипативных сил происходит рассеивание энергии при ударе. Для расчета количества энергии, переданной проводу, он был заменен маятником с эквивалентной массой и экспериментально определена высота его максимального отклонения при ударе. Такая замена обусловлена особенностями экспериментальной установки: вследствие того, что нить маятника является нежесткой, ударяющий маятник после столкновения отскакивает в смещенной плоскости. Сам провод за счет закрепления не имеет степеней свободы, в связи с чем по его отклонению нельзя судить о количестве переданной энергии. Поэтому вместо провода установлен второй маятник, на котором подвешено тело, сопоставимое с массой провода со льдом, выполненное из того же материала, что и отбойник на проводе (стали). Сила трения при движении маятника вокруг оси минимизирована, масса жесткого нерастяжимого стержня мала по сравнению с массой тела маятника. За маятником расположено рабочее поле с нанесенной координатной сеткой. Таким образом, были получены высоты отклонения второго маятника при ударе и рассчитано количество переданной энергии (табл. 3).

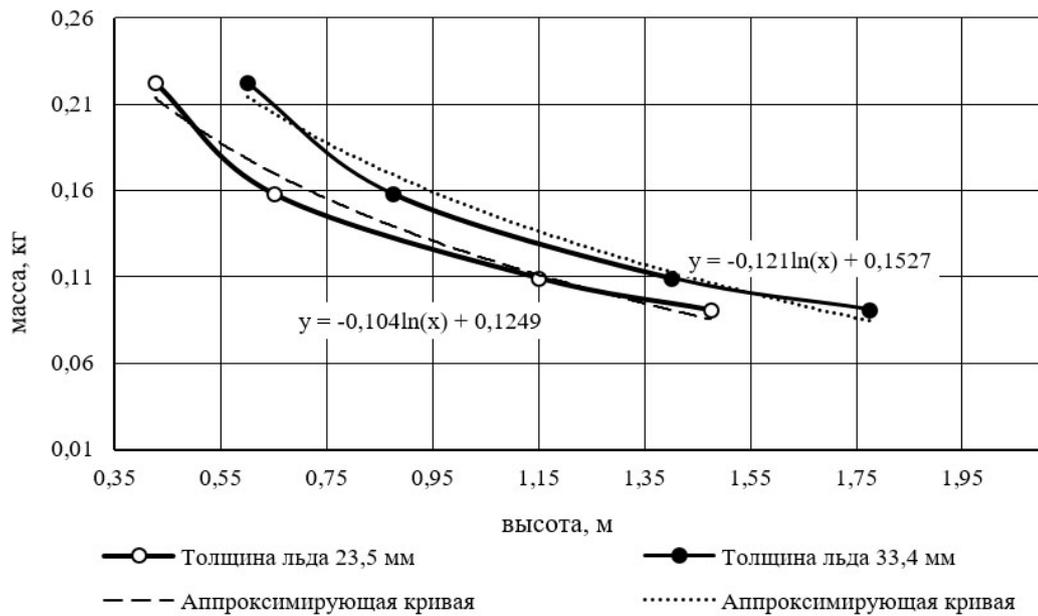


Рис. 1. Зависимость массы груза от высоты его поднятия

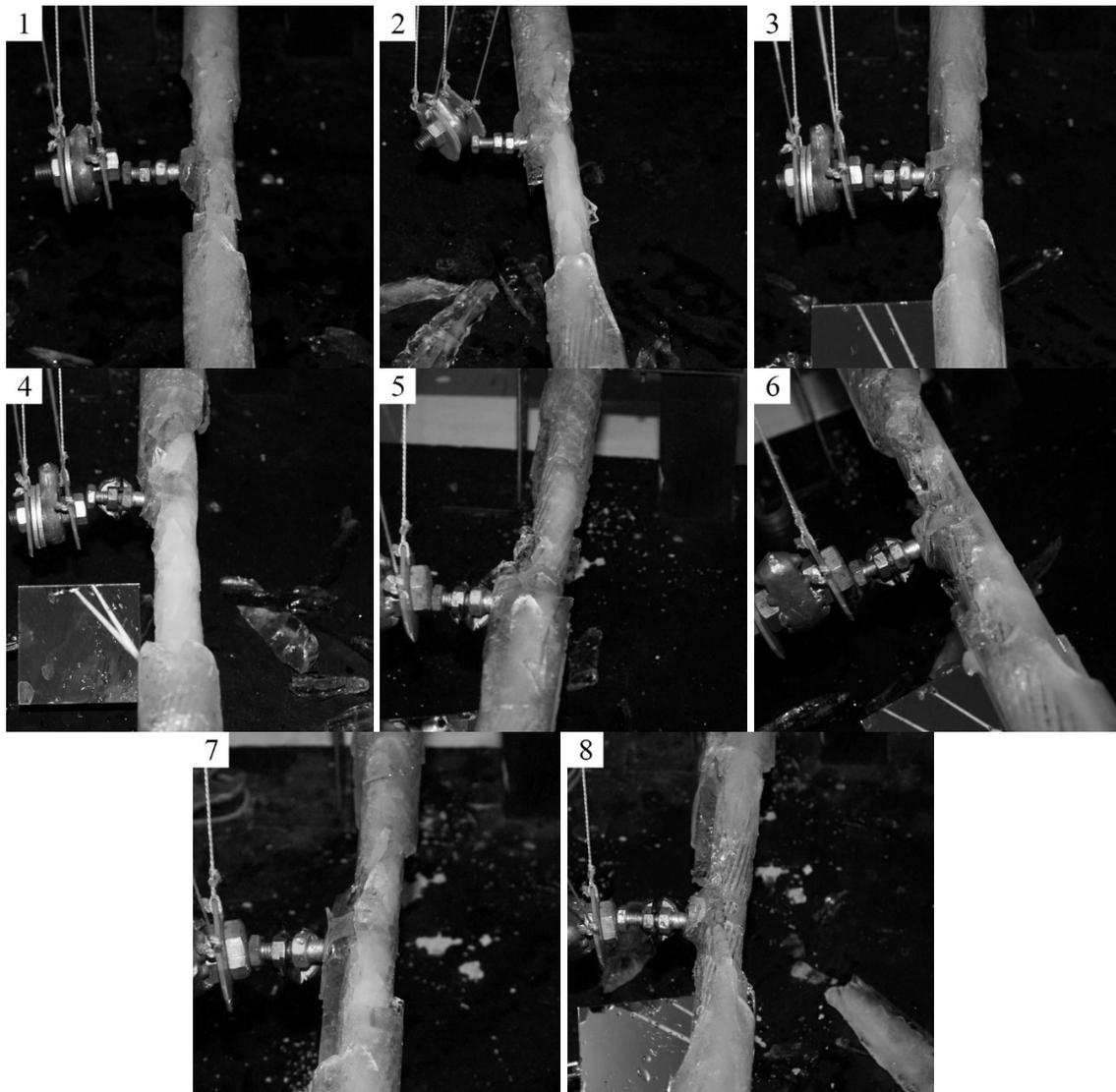


Рис. 2. Сценарии удара по проводу, соответствующие критерию разрушения

Таблица 3

Параметры и результаты испытаний

Вариант сценария	Скорость груза в нижней точке, м/с	Высота отклонения второго маятника, м	Запасенная энергия, Дж	Переданная энергия, Дж	Эффективность передачи энергии, $E_{II}/E_3 \cdot 100 \%$
1	5,379	$23,86 \cdot 10^{-3}$	1,316	0,169	12,9
2	5,900	$27,25 \cdot 10^{-3}$	1,584	0,194	12,2
3	4,749	$25,39 \cdot 10^{-3}$	1,235	0,181	14,6
4	5,240	$34,13 \cdot 10^{-3}$	1,503	0,243	16,1
5	3,571	$36,74 \cdot 10^{-3}$	1,007	0,261	25,9
6	4,143	$53,97 \cdot 10^{-3}$	1,356	0,384	28,3
7	2,888	$48,08 \cdot 10^{-3}$	0,927	0,342	36,9
8	3,430	$66,43 \cdot 10^{-3}$	1,309	0,361	36,1

На рис. 3 приведены графики зависимости запасенной и переданной энергии от скорости ударяющего тела с учетом того, что удар является частично упругим.

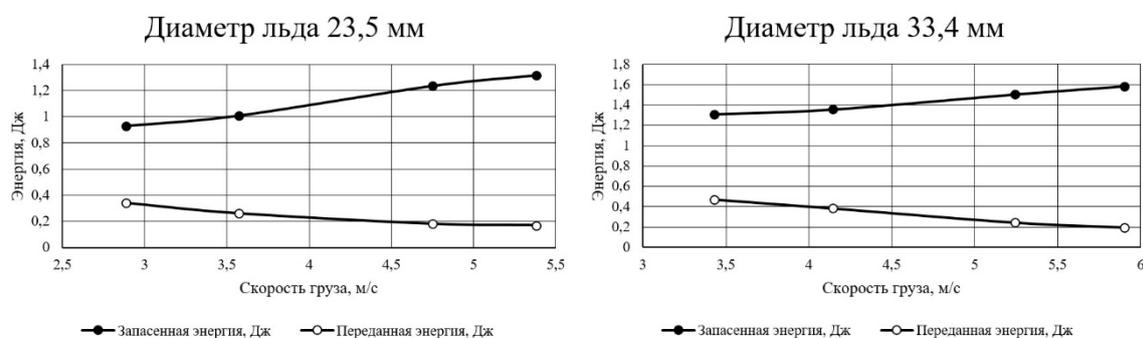


Рис. 3. Графики зависимости запасенной и переданной энергии от скорости удара

В отличие от случая, когда мы считали удар абсолютно упругим, и с ростом запасенной энергии и скорости удара количество переданной проводу энергии незначительно возрастало [23], в случае частично упругого удара с ростом скорости удара происходит обратное пропорциональное снижение количества энергии, требуемой для разрушения льда. В то же время наблюдается повышение эффективности передачи энергии с 12 до 36 % с увеличением массы ударника. Таким образом, из эксперимента мы видим, что коэффициент передачи зависит не только от материала соударяющихся тел, но и от скорости ударяющего тела и его массы. Так, при выстреле пульей, масса которой (0,49 г) значительно меньше масс грузов, используемых в эксперименте, а кинетическая энергия при ударе значительно выше (8,5 Дж), эффективность передачи энергии составляет менее 0,1 %. Такой энергии, сообщенной проводу, недостаточно даже для образования трещин во льду.

Заключение

Таким образом, впервые проведены исследования реакции ледяной трубки, намерзшей на провод при ударе по отбойнику, закрепленному непосредственно на проводе до начала обледенения. Сформулирован критерий разрушения ледяного нароста, позволяющий однозначно определять необходимую и достаточную энергию для растрескивания и сброса льда в радиусе 5–10 см от места удара. Исследования проведены с помощью маятника в диапазоне скоростей 3–5 м/с. Подтверждено предположение о снижении количества энергии, требуемой на разрушение льда с ростом скорости удара. Наилучшая эффективность передачи энергии ожидается при равенстве масс ударяющего и ударяемого тел, что в совокупности с высокими скоростями воздействия на обледеневший провод является целевыми параметрами разрабатываемого противообледенительного устройства.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90188.

The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90188.

Библиографический список

1. *Гольдштейн, Р. В.* Адгезионная прочность гололедных отложений на элементах металлических конструкций / Р. В. Гольдштейн, В. П. Епифанов // Вестник Новосибирского государственного университета. Сер.: Математика, механика, информатика. – 2012. – Т. 12, вып. 4. – С. 21–40.
2. *Осташев, Н. А.* Зависимость деформации материалов от времени воздействия нагрузки и скорости ее приложения / Н. А. Осташев ; ред. И. А. Рохлин. – Киев : Изд-во Академии архитектуры Украинской ССР, 1954. – 35 с.
3. *Карташкин, Б. Д.* Экспериментальные исследования физико-механических свойств льда / Б. Д. Карташкин // Труды ЦАГИ. – 1947. – № 607. – 42 с.
4. *Мельникова, Н. А.* Численное моделирование деформирования и разрушения анизотропных сред (на примере озерного льда) : дис. ... канд. физ.-мат. наук / Мельникова Н. А. – Томск, 2010. – 165 с.
5. *Бычковский, Н. Н.* Ледовые строительные площадки, дороги и переправы / Н. Н. Бычковский, Ю. А. Гурьянов. – Саратов : СГТУ, 2005. – 258 с.
6. Физика океана / В. В. Богородский, А. В. Гусев, Ю. П. Доронин, Л. Н. Кузнецова, К. С. Шифрин. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1978. – 296 с.
7. Физика и механика льда : пер. с англ. / под ред. П. Трюде. – Москва : Мир, 1983. – 352 с.
8. *Лобанов, В. А.* Моделирование льда в задачах с конечно-элементной постановкой / В. А. Лобанов // Дифференциальные уравнения и процессы управления. – 2008. – № 4.
9. *Мельникова, Г. В.* Математическое моделирование повреждений рабочих лопаток вентиляторов при попадании льда / Г. В. Мельникова, В. С. Мацаренко, Н. Н. Серебряков // Труды ЦИАМ № 1344: Современные методы обеспечения прочностной надежности деталей авиационных двигателей. – Москва : ТОРУС ПРЕСС, 2010. – С. 107–118.
10. Development of a portable de-icing device for overhead ground wires / A. Leblond, B. Lamarche, D. Bouchard, B. Panaroni, M. Hamel // The 11th Int. workshop on atmospheric icing of structures. – Canada, 2005. – P. 399–404.
11. *Богородский, В. В.* Разрушение льда. Методы, технические средства / В. В. Богородский, В. П. Гаврило, О. А. Недошивин. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. – 232 с.
12. Вопросы ледотехники : сб. ст. / под ред. К. Н. Коржавина. – Новосибирск, 1958.
13. A novel ice-shedding model for overhead power line conductors with the consideration of adhesive/cohesive forces / K. Ji, X. Rui, L. Li, A. Leblond, G. McClure // Computers & Structures. – 2015. – № 157. – P. 153–164.
14. *Сухоруков, С. И.* Автоматизированная система удаления льда с проводов ЛЭП : дис. ... канд. техн. наук / Сухоруков С. И. – Комсомольск-на-Амуре, 2016. – 220 с.
15. *Доронин, Ю. П.* Морской лед / Ю. П. Доронин, Д. Е. Хейсин. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1975. – 318 с.
16. *Коржавин, К. Н.* Воздействие льда на инженерные сооружения / К. Н. Коржавин. – Новосибирск : СО АН СССР, 1962. – 224 с.
17. *Вершинин, С. А.* Разрушение и деформации морских ледяных полей, взаимодействующих с объектами континентального шельфа : дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Вершинин С. А. – Москва, 1984. – 408 с.
18. *Ратушняк, В. С.* Некоторые аспекты выбора средств борьбы с гололедными отложениями на ЛЭП / В. С. Ратушняк // Известия Транссиба. – 2019. – № 1 (37). – С. 102–111.
19. Пат. 2666754 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Способ и устройство для удаления наледи с проводов линий электропередачи / Ратушняк В. С., Юрьев А. В., Ильин Е. С., Трухина И. С., Ратушняк В. С.; заявитель и патентообладатель ООО «Научно-производственное предприятие «СибТрансНаука». – № 2017136405; заявл.16.10.2017; опубл.12.09.2018, Бюл. № 26.
20. Пат. 2666225 Российская Федерация, МПК Н 03 Л 3/53. Генератор импульсных токов для высоковольтных электрогидравлических технологий / Ратушняк В. С., Гаранин А. Е., Юрьев А. В., Ильин Е. С.; заявитель и патентообладатель ООО «Научно-производственное предприятие «СибТрансНаука». – № 2017123323; заявл.03.07.2017; опубл.06.09.2018, Бюл. № 25.
21. *Сергиенко, Т. А.* Аппаратный комплекс по удалению наледи с водостоков и карнизов зданий электроимпульсным способом / Т. А. Сергиенко, Е. С. Ильин, В. С. Ратушняк, А. В. Юрьев // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта : сб. науч. тр. – Красноярск : КриЖТ ИрГУПС, 2015. – Т. 1. – С. 72–75.

22. Iljin, E. S. Experience in the magnetic pulse installation model use to clean the gondola car from the frosted and packed cargo / E. S. Iljin, O. Yu. Vakhrusheva, V. S. Ratushnyak, A. V. Yur'ev // VI International symposium on innovation and sustainability of modern railway. – Irkutsk, 2018. – P. 237–245.
23. Ратушняк, В. С. Метод экспериментального исследования ударного воздействия на провод ЛЭП / В. С. Ратушняк, Е. С. Ильин, В. С. Ратушняк // Computational nanotechnology. – 2019. – № 2. – С. 33–38.

References

1. Gol'dshteyn R. V., Epifanov V. P. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Matematika, mekhanika, informatika* [Bulletin of Novosibirsk state University. Ser.: Mathematics, mechanics, computer science]. 2012, vol. 12, iss. 4, pp. 21–40. [In Russian]
2. Ostashev N. A. *Zavisimost' deformatsii materialov ot vremeni vozdeystviya nagruzki i skorosti ee prilozheniya* [The dependence of material deformation on the time of impact of the load and the speed of its application]. Kiev: Izd-vo Akademii arkhitektury Ukrainsoy SSR, 1954, 35 p. [In Russian]
3. Kartashkin B. D. *Trudy TsAGI* [Experimental studies of physical and mechanical properties of ice]. 1947, no. 607, 42 p. [In Russian]
4. Mel'nikova N. A. *Chislennoe modelirovanie deformirovaniya i razrusheniya anizotropnykh sred (na primere ozernogo l'da): dis. kand. fiz.-mat. nauk* [Numerical modeling of deformation and destruction of anisotropic media (on the example of lake ice): dis. ... candidate of physical and mathematical sciences]. Tomsk, 2010, 165 p. [In Russian]
5. Bychkovskiy N. N., Gur'yanov Yu. A. *Ledovye stroitel'nye ploshchadki, dorogi i perepravy* [Ice construction sites, roads, and crossings]. Saratov: SGTU, 2005, 258 p. [In Russian]
6. Bogorodskiy V. V., Gusev A. V., Doronin Yu. P., Kuznetsova L. N., Shifrin K. S. *Fizika okeana* [Physics of the ocean]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978, 296 p. [In Russian]
7. *Fizika i mekhanika l'da: per. s angl.* [Physics and mechanics of ice: trans. from English.]. Ed. P. Tryude. Moscow: Mir, 1983, 352 p. [In Russian]
8. Lobanov V. A. *Differentsial'nye uravneniya i protsessy upravleniya* [Ice modeling in problems with finite element formulation]. 2008, no. 4. [In Russian]
9. Mel'nikova G. V., Matsarenko V. S., Serebryakov N. N. *Trudy TsIAM № 1344: Sovremennye metody obespecheniya prochnostnoy nadezhnosti detaley aviatsionnykh dvigateley* [Works of CIAM No. 1344: Modern methods for ensuring the strength reliability of aircraft engine parts]. Moscow: TORUS PRESS, 2010, pp. 107–118. [In Russian]
10. Leblond A., Lamarche B., Bouchard D., Panaroni B., Hamel M. *The 11th Int. workshop on atmospheric icing of structures*. Canada, 2005, pp. 399–404.
11. Bogorodskiy V. V., Gavrilov V. P., Nedoshivin O. A. *Razrushenie l'da. Metody, tekhnicheskie sredstva* [Destruction of ice. Methods and technical means]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983, 232 p. [In Russian]
12. *Voprosy ledotekhniki: sb. st.* [Questions of ice engineering: coll. of art.]. Ed. K. N. Korzhavin. Novosibirsk, 1958. [In Russian]
13. Ji K., Rui X., Li L., Leblond A., McClure G. *Computers & Structures*. 2015, no. 157, pp. 153–164.
14. Sukhorukov S. I. *Avtomatizirovannaya sistema udaleniya l'da s provodov LEP: dis. kand. tekhn. nauk* [Automated system for the removal of ice from wires of power transmission lines : dis. ... cand. techn. sciences]. Komsomol'sk-on-Amur, 2016, 220 p. [In Russian]
15. Doronin Yu. P., Kheysin D. E. *Morskoy led* [Sea ice]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975, 318 p. [In Russian]
16. Korzhavin K. N. *Vozdeystvie l'da na inzhenernye sooruzheniya* [Impact of ice on engineering structures]. Novosibirsk: SO AN SSSR, 1962, 224 p. [In Russian]
17. Vershinin S. A. *Razrushenie i deformatsii morskikh ledyanykh poley, vzaimodeystvuyushchikh s ob'ektami kontinental'nogo shel'fa: dis. d-ra fiz.-mat. nauk* [Destruction and deformations of sea ice fields interacting with continental shelf objects: dis. ... doctor of physical and mathematical Sciences]. Moscow, 1984, 408 p. [In Russian]
18. Ratushnyak V. S. *Izvestiya Transsiba* [Proceedings of the Trans-Siberian Railway]. 2019, no. 1 (37), pp. 102–111. [In Russian]
19. *Pat. 2666754 Rossiyskaya Federatsiya, MPK N 02 G 7/16. Sposob i ustroystvo dlya udaleniya naledi s provodov liniy elektroperedachi* [Pat. 2666754 Russian Federation, IPC N 02 G 7/16. Method and device for removal of ice from wires of power transmission lines]. Ratushnyak V. S., Yur'ev A. V., Il'in E. S., Trukhina I. S., Ra-tushnyak V. S.; applicant and patent holder ООО «Nauchno-proizvodstvennoe predpriyatie «Sib-TransNauka». No. 2017136405; appl.16.10.2017; publ.12.09.2018, bull. no. 26. [In Russian]
20. *Pat. 2666225 Rossiyskaya Federatsiya, MPK N 03 L 3/53. Generator impul'snykh tokov dlya vysokovol'tnykh elektrogidravlicheskiy tekhnologiy* [Pat. 2666225 Russian Federation, IPC N 03 L 3/53.

- Pulse current generator for high-voltage electro-hydraulic technologies]. Ratushnyak V. S., Garanin A. E., Yur'ev A. V., Il'in E. S.; applicant and patent holder ООО «Nauchno-proizvodstvennoe predpriyatie «Sib-TransNauka». No. 2017123323; appl.03.07.2017; publ.06.09.2018, bull. no. 25. [In Russian]
21. Sergienko T. A., Il'in E. S., Ratushnyak V. S., Yur'ev A. V. *Problemy i perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta: sb. nauch. tr.* [Problems and prospects of railway transport development: collection of scientific papers]. Krasnoyarsk: KrIZhT IrGUPS, 2015, vol. 1, pp 72–75. [In Russian]
 22. Iljin E. S., Vakhrusheva O. Yu., Ratushnyak V. S., Yur'ev A. V. *VI International symposium on innovation and sustainability of modern railway.* Irkutsk, 2018, pp. 237–245.
 23. Ratushnyak V. S., Il'in E. S., Ratushnyak V. S. *Computational nanotechnology.* 2019, no. 2, pp. 33–38.

Ратушняк Валентина Сергеевна

аспирант,
Иркутский государственный университет
путей сообщения
(Россия, г. Красноярск, ул. Новая заря, 2И)
E-mail: ratushnyak_vas@krsk.irkups.ru

Ratushnyak Valentina Sergeevna

postgraduate student,
Irkutsk State Transport University
(2i Novaya zarya street, Krasnoyarsk, Russia)

Образец цитирования:

Ратушняк, В. С. Результаты экспериментального исследования ударного воздействия на лед, намороженный на провод ЛЭП / В. С. Ратушняк // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 1 (31). – С. 59–66. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-8.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 531.781.2.084.2

DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-9

*Д. А. Гулиева, Н. С. Чапанов, Т. Б. Неврюзина*ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ*D. A. Gulieva, N. S. Chaparov, T. B. Nevruzina*RESEARCH OF PROPERTIES OF HIGH-TEMPERATURE
ELECTRODES FOR PIEZOELEMENTS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Пьезоэлементы находят широкое применение в современных технических устройствах разного назначения. Целью работы является исследование влияния различных видов металлизированных покрытий на пьезоэлементы методом магнетронного напыления. **Материалы и методы.** Изготовлены макеты пьезоэлементов, напыленные титан-никель с помощью метода магнетронного напыления. **Результаты.** Проведена отработка технологии напыления высокотемпературной контактной группы титан-никель на установке вакуумного магнетронного напыления EvoVac на вращающуюся карусель подложек. Изготовлены экспериментальные макетные образцы на кремниевых пластинах с высокотемпературными контактами титан-никель, проведена проверка адгезии напыленной пленки методом разварки золотой проволоки. **Выводы.** Магнетронным методом сформированы высокотемпературные электроды на пьезокерамических модулях, позволяющие напылять электроды на высокотемпературные материалы пьезоэлементов системой титанат-ниобат висмута.

A b s t r a c t. Background. Piezoelectric elements are widely used in modern technical devices for various purposes. The aim of the work is to study the effect of various types of metalized coatings on piezoelectric elements by magnetron sputtering. **Materials and methods.** Models of piezoelectric elements sprayed with titanium-nickel were made using the magnetron sputtering method. **Results.** The technology for spraying a high-temperature contact group of titanium-nickel was tested at the EvoVac vacuum magnetron sputtering device on a rotating carousel of substrates. Experimental prototype samples were made on silicon wafers with high-temperature titanium-nickel contacts, and the adhesion of the deposited film was verified by gold wire welding. **Conclusions.** High-temperature electrodes were formed by the magnetron method on piezoceramic modules, which make it possible to spray electrodes on high-temperature piezoelectric materials by a bismuth titanate-niobate system.

К л ю ч е в ы е с л о в а: пьезоэлемент, высокотемпературные электроды, метод магнетронного напыления, чувствительный элемент, титан-никель, титанат-ниобат висмута.

К e y w o r d s: piezoelectric element, high-temperature electrodes, magnetron sputtering method, sensitive element, titanium-nickel, titanate-niobate of bismuth.

В настоящее время при создании высокотемпературных контактов широко используются тонкие пленки, полученные магнетронным плазмохимическим методом. Процесс металлизации на кремниевых пластинах является одной из конечных операций при формировании чувствительных элементов современных полупроводниковых приборов [1–3], позволяющей обеспечить надежный механический и омический контакт при сборке кристаллов в корпуса.

Формирование металлизации происходит на напылительном оборудовании на основе магнетронных систем, так как оно обладает рядом достоинств, таких как высокая скорость роста пленок, малое загрязнение посторонними газами и хорошая адгезия пленок к кремниевым подложкам.

В частности, металлизация может представлять собой двухкомпонентную систему из подслоя титана и напыленного на него никеля (Ti-Ni) [4]. В качестве первого слоя наносится титан с отработанными режимами работы и скоростью напыления. В данной системе используется адгезионный слой титана, обеспечивающий хорошую адгезию к кремнию и никелю. Нанесение второго слоя никеля позволяет сформировать двухслойную металлизацию при определенных температурных режимах для подложки с общей толщиной структуры от 1,5 до 2 мкм.

Двухслойное покрытие, нанесенное по способу, описанному выше, обеспечивает необходимый омический контакт, характеризуемый высокой воспроизводимостью и стабильностью параметров получаемых структур, а также отличается большим сроком службы.

В изготовлении микроэлектромеханических систем (МЭМС) на основе кремния используются материалы чувствительные к механическим деформациям [5–9]. В связи с этим при формировании контактных структур необходимо создать условия напыления, при которых механические напряжения, возникающие при осаждении металлических пленок, будут сведены к минимуму.

Этого можно достигнуть при соблюдении следующих условий: использовании пластичных материалов; проведении напыления при наиболее низких температурах; исключении циклических термообработок.

При достаточно низких гомологических температурах T (безразмерная величина, численно равная отношению температуры вещества к температуре его плавления) вещества адатомы (атомы, находящиеся на поверхности кристалла) никеля и титана будут иметь очень низкую подвижность [10, 11], так как они не могут преодолеть барьер поверхностной диффузии E_d . Это означает, что прибывающие с мишени атомы будут «прилипать» к поверхности растущей пленки в том месте, куда они изначально попали. Из-за этого образуется структура пленки, состоящая из колонн, разделенных порами. Данные колонны в пленке не всегда состоят из одного кристаллического зерна, они могут состоять из многих зерен или быть аморфными (рис. 1). Их образование связано с ростом шероховатости напыляемой поверхности и геометрическим самозатенением, что в свою очередь влияет на качество омического контакта и уменьшение долговечности данных структур.

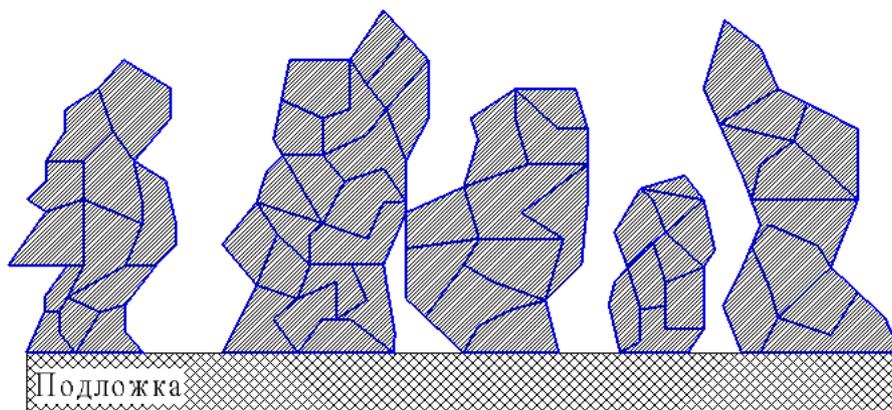


Рис. 1. Структура пленки в условиях низкой гомогенной температуры при отсутствии энергетического бомбардирования

Этого можно избежать при повышении гомологической температуры до той точки, при которой адатомы будут способны преодолевать барьер поверхностной диффузии, а также при обеспечении непрерывной бомбардировки энергичными частицами.

Толщина пленки в заданной точке на подложке определяется по формуле

$$h = M \frac{\cos \phi \cdot \cos \alpha}{r^2} t,$$

где M – постоянный параметр, пропорциональный скорости распыления; t – время нанесения пленки; r – расстояние между точками распыления и конденсации; $\cos \phi$ – угол распыления; $\cos \alpha$ – угол конденсации.

В основном в качестве инертного газа для обеспечения непрерывной бомбардировки в рабочей камере применяется аргон, находясь в объеме разряда в виде нейтральных атомов. Аргон может влиять на процесс нанесения структуры следующим образом: образовывать загрязнение растущей пленки; нарушать угловое и пространственное распределение распыленного материала за счет соударений с частицами распыляемого вещества. С повышением температуры средняя колебательная энергия частиц возрастает настолько, что становится выше энергии связи с другими частицами, и они покидают поверхность (испаряются) и распространяются в свободном пространстве.

Скорость испарения, т.е. количество вещества (в граммах), покидающее 1 см^2 свободной поверхности в 1 с при условной температуре испарения T_y :

$$v_{\text{и}} = 6 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{M}{T_y}},$$

где M – молекулярная масса, г/моль.

Скорость испарения большинства элементов при T_y составляет $10^{-4} \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Для получения приемлемых скоростей роста пленки, а также экономного расходования материала следует создавать условия движения частиц испаряемого вещества преимущественно по направлению к подложке. При этом необходим достаточно глубокий вакуум, при котором исключаются столкновения молекул остаточного газа с молекулами вещества и рассеивание их потока на пути к подложке [10].

Нарушение углового и пространственного распределения распыленного материала является ключевым фактором при создании необходимой структуры пленки. Это означает, что адатомы будут способны диффундировать по поверхности подложки и зерен, а возникающая термически стимулированная подвижность атомов позволяет им объединяться в зародыши и формировать кристаллические острова [12–14]. В результате поверхностной диффузии каждый островок или зерно будет способно расти в соответствии с их кристаллическим габитусом. В данных условиях адатомы хотя и могут преодолевать диффузионный барьер, но не могут с помощью диффузии выйти из зерна или перейти от одного зерна к другому. Поэтому каждое зерно в структуре растет независимо от других до их соприкосновения. После соприкосновения зерен заполнение пространства между ними происходит независимо от энергичной бомбардировки. Это происходит из-за высокой подвижности адатомов. Вследствие этого островки остаются разделенными только границами зерен, что схематично представлено на рис. 2.

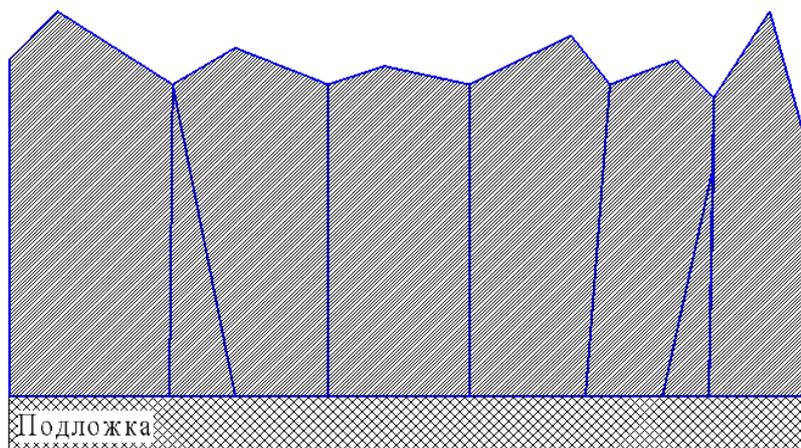


Рис. 2. Структура пленки с беспорядочной ориентацией вне плоскости

Исследование влияния различных видов металлизированных покрытий пьезоэлементов на основе метода магнетронного плазмохимического напыления позволило воспроизвести химический состав титана и никеля для высокотемпературной контактной группы. Нанесение пленки с помощью двухслойного покрытия, описанного в начале статьи, позволило получить структуру пленки, в которой все зерна огранены и ориентированы вне плоскости (рис. 2). Впоследствии получается высокотемпературная контактная группа, обеспечивающая стабильный омический и механический контакт.

Обработка напыления высокотемпературной контактной группы титан-никель до необходимой толщины пленки (рис. 3) производилась на ситалловых подложках с напыленным на них керметом, подложки подвергались очистке в парах изопропилового спирта непосредственно перед напылением.

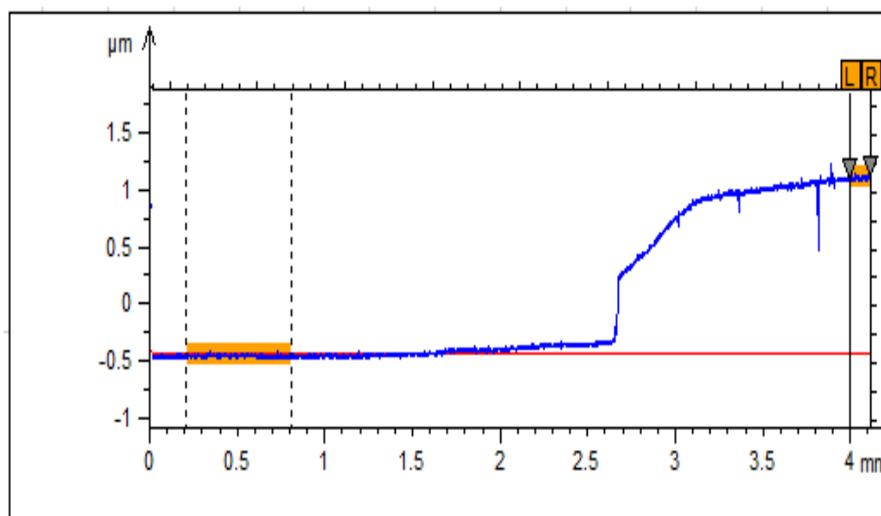


Рис. 3. Толщина пленки и профиль полученной структуры

Изготовлены экспериментальные макетные образцы на кремниевых пластинах, проведена проверка адгезии напыленной пленки методом разварки золотой проволоки. Адгезия составила более 10 г, соответствующая требованиям, предъявляемым заказчиком.

Библиографический список

1. Мельников, А. А. Система контроля состояния пьезоэлектрических датчиков давления / А. А. Мельников, Б. В. Цыпин, К. И. Бастрыгин, В. В. Кикот // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 4 (10). – С. 29–34
2. Аверин, И. А. Влияние переходных процессов в тонкопленочной гетероструктуре на надежность чувствительных элементов тензорезисторных датчиков давления / И. А. Аверин, И. В. Волохов, Е. А. Мокров, Р. М. Печерская // Региональная научно-практическая конференция по проблемам и развитию наноиндустрии в Пензенской области 21 апреля 2008 г. : сб. докл. – Пенза : ФНПЦ ФГУП «НИИФИ», 2008. – С. 70–76.
3. Кикот, В. В. Коррекция температурной погрешности пьезоэлектрического датчика динамического давления в условиях термоудара / В. В. Кикот, В. П. Маланин, М. А. Щербаков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (39). – С. 105–113.
4. Богуш, М. В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Пьезоэлектрическое приборостроение / М. В. Богуш. – Ростов-на-Дону : СКНЦ ВШ, 2006. – Т. 3. – 346 с.
5. Кривцов, В. А. Высокотемпературные акустические датчики с органосиликатной изоляцией / В. А. Кривцов, Р. Ф. Масагутов. – Ленинград : Наука, 1982. – 167 с.
6. Pak, Ch. G. Investigation of the influence of shock activation on main properties of piezoelectric ceramics / Ch. G. Pak, A. V. Pryshchak, G. A. Koshkin // Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations : 14th International Symposium (Saint Petersburg, 14–18 may 2018). – Saint-Petersburg, 2018. – P. 162–163.
7. Исследование возможностей повышения пьезоактивности высокотемпературных пьезоэлементов / А. И. Спицин, Д. А. Добрынин, А. М. Храмов, А. Г. Сегалла, А. А. Буш // Фундаментальные про-

блемы радиоэлектронного приборостроения : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Москва, 2015. – Ч. 3. – С. 27–31.

8. Nanao, M. Piezoelectric Properties of Bi₃TiNbO₉ – BaBi₂Nb₂O₉ Ceramics / M. Nanao, M. Hirose, T. Tsukada // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2001. – Т. 40, № 9S. – 5727 с.
9. Heywang, W. Tailoring of Piezoelectric Ceramics / W. Heywang, H. Thomann // *Annual Review of Materials Science*. – 1984. – Т. 14, № 1. – С. 27–47.
10. Минайчев, В. Е. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники : учеб. пособие для ПТУ. Кн. 6. Нанесение пленок в вакууме / В. Е. Минайчев. – Москва : Высш. шк., 1989. – 110 с.
11. Чебурахин, И. Н. Коррекция температурной погрешности, аппроксимация градуировочных характеристик чувствительных элементов датчикообразующей аппаратуры с внутридатчиковой электроникой / И. Н. Чебурахин, Д. И. Нефедьев // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. – 2015. – № 4 (14). – С. 32–41.
12. Кучумов, Е. В. Струнный автогенераторный измерительный преобразователь на основе пьезоструктуры / Е. В. Кучумов, И. Н. Баринов, В. С. Волков // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. – 2014. – № 2 (8). – С. 58–65.
13. Применение пьезоструктур для создания струнного измерительного преобразователя на основе автоколебательной системы / Е. В. Кучумов, И. Н. Баринов, В. С. Волков, С. А. Гурин, С. П. Евдокимов // *Измерительная техника*. – 2015. – № 6. – С. 49–52.
14. Датчики. Преобразователи. Системы. Каталог АО «НИИФИ». – Пенза : Пензенская правда, 2011. – С. 70–98.

References

1. Mel'nikov A. A., Tsybin B. V., Bastrygin K. I., Kikot V. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 4 (10), pp. 29–34. [In Russian]
2. Averin I. A., Volokhov I. V., Mokrov E. A., Pecherskaya R. M. *Regional'naya nauchno-prakticheskaya konferentsiya po problemam i razvitiyu nanoindustrii v Penzenskoy oblasti 21 aprelya 2008 g.: sb. dokl.* [Regional scientific and practical conference on problems and development of nanoindustry in the Penza region on April 21, 2008: collection of reports]. Penza: FNPTs FGUP «NIIFI», 2008, pp. 70–76. [In Russian]
3. Kikot V. V., Malanin V. P., Shcherbakov M. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki* [News of higher educational institutions. Volga region. Technical science]. 2016, no. 3 (39), pp. 105–113. [In Russian]
4. Bogush M. V. *P'ezoelektricheskie datchiki dlya ekstremal'nykh usloviy ekspluatatsii. P'ezoelektricheskoe priborostroenie* [Piezoelectric sensors for extreme operating conditions. Piezoelectric instrumentation]. Rostov-on-Don: SKNTs VSh, 2006, vol. 3, 346 p. [In Russian]
5. Krivtsov V. A., Masagutov R. F. *Vysokotemperaturnye akusticheskie datchiki s organosilikatnoy izolyatsiey* [High-temperature acoustic sensors with organosilicate insulation]. Leningrad: Nauka, 1982, 167 p. [In Russian]
6. Pak Ch. G., Pryshchak A. V., Koshkin G. A. *Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations: 14th International Symposium (Saint Petersburg, 14–18 may 2018)*. Saint-Petersburg, 2018, pp. 162–163.
7. Spitsin A. I., Dobrynin D. A., Khramtsov A. M., Segalla A. G., Bush A. A. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Fundamental problems of radio-electronic instrumentation: materials of the international conference. scientific-technical Conf.]. Moscow, 2015, part 3, pp. 27–31. [In Russian]
8. Nanao M., Hirose M., Tsukada T. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2001, vol. 40, no. 9S, 5727 p.
9. Heywang W, Thomann H. *Annual Review of Materials Science*. 1984, vol. 14, no. 1, pp. 27–47.
10. Minaychev V. E. *Tekhnologiya poluprovodnikovyykh priborov i izdeliy mikroelektroniki: ucheb. posobie dlya PTU. Kn. 6. Nanesenie plenok v vakuume* [Technology of semiconductor devices and microelectronics products: textbook for vocational schools. Book 6. Applying films in a vacuum]. Moscow: Vyssh. shk., 1989, 110 p. [In Russian]
11. Cheburakhin I. N., Nefed'ev D. I. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2015, no. 4 (14), pp. 32–41. [In Russian]
12. Kuchumov E. V., Barinov I. N., Volkov V. S. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 2 (8), pp. 58–65. [In Russian]
13. Kuchumov E. V., Barinov I. N., Volkov V. S., Gurin S. A., Evdokimov S. P. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 2015, no. 6, pp. 49–52. [In Russian]
14. *Datchiki. Preobrazovateli. Sistemy. Katalog AO «NIIFI»* [Sensors. Converters. The system. Catalog of JSC "NIIFI"]. Penza: Penzenskaya pravda, 2011, pp. 70–98. [In Russian]

Гулиева Дарья Александровна

инженер-технолог,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: dashuliy2308@yandex.ru

Чапанов Никита Сергеевич

инженер-технолог,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: dashuliy2308@yandex.ru

Неврюзина Тина Бакировна

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
инженер-технолог
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: tina_nevruzina@mail.ru

Gulieva Dar'ya Aleksandrovna

process engineer,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Chapanov Nikita Sergeevich

process engineer,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Nevryuzina Tina Bakirovna

mastergraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
process engineer,
Scientific-research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Гулиева, Д. А. Исследование свойств высокотемпературных электродов для пьезоэлементов /
Д. А. Гулиева, Н. С. Чапанов, Т. Б. Неврюзина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. –
2020. – № 1 (31). – С. 67–72. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-9.

*Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская, В. И. Кондрашин,
К. Ю. Спицына, А. В. Фимин, О. А. Мельников*

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛЕНОК ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ОКСИДОВ

*T. O. Zinchenko, E. A. Pecherskaya, V. I. Kondrashin,
K. Yu. Spitsyna, A. V. Fimin, O. A. Mel'nikov*

ANALYSIS OF THE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF TRANSPARENT FILMS CONDUCTIVE OXIDES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Прозрачные проводящие оксиды, представляющие собой тонкопленочные покрытия (полупроводниковые оксиды металлов, полимеры, углеродные структуры) с высокой электропроводностью и хорошей оптической прозрачностью, являются перспективными материалами в солнечных элементах, «умных» стеклах, применяются в функциональной электронике. Цель исследования – анализ зависимостей электрофизических параметров пленок SnO₂ от концентрации примеси, объема раствора, что позволяет установить оптимальные технологические режимы для получения оксидных покрытий с улучшенными свойствами. **Материалы и методы.** Для получения пленок SnO₂ применен метод спрей-пиролиза – один из наиболее перспективных методов с точки зрения нанесения прозрачных проводящих покрытий на подложки большой площади. В качестве подложек использованы натриево-кальциево-силикатные стекла. Нанесение пленок SnO₂ произведено из растворов, содержащих тетрахлорид пентагидрат олова (SnCl₄·5H₂O), в качестве растворителя использован этанол. Для измерения электрофизических параметров пленок применены четырехзондовый метод и метод Ван дер Пау. **Результаты.** В результате проведенных экспериментов определены электрофизические параметры образцов прозрачных проводящих оксидов, полученных при разных технологических режимах. Построены графики зависимостей поверхностного сопротивления, подвижности носителей заряда от концентрации примеси, что позволило проанализировать механизмы рассеяния, присутствующие в оксидных пленках. **Выводы.** Подтверждена теория о том, что в прозрачных проводящих оксидах рассеяние на ионизированных примесях является основным механизмом, ограничивающим подвижность носителей заряда. Установлены критические значения концентрации примеси, при увеличении которых качество синтезируемых пленок ухудшается по причине увеличения поверхностного сопротивления, снижения подвижности носителей зарядов. Указанные выводы использованы при определении оптимальных технологических режимов.

A b s t r a c t. Background. Transparent conductive oxides, which are thin-film coatings (semiconductor metal oxides, polymers, carbon structures) with high electrical conductivity and good optical transparency, are promising materials in solar cells, smart glasses, and are used in functional electronics. The purpose of the study is to analyze the dependences of the electrophysical parameters of SnO₂ films on the impurity concentration and solution volume, which allows us to establish optimal technological conditions for producing oxide coatings with improved properties. **Materials and methods.** To obtain SnO₂ films, the spray pyrolysis method was used – one of the most promising methods from the point of view of applying transpar-

ent conductive coatings to large-area substrates. Sodium-calcium-silicate glasses were used as substrates. The SnO₂ films were deposited from solutions containing tin pentahydrate tetrachloride (SnCl₄ · 5H₂O), and ethanol was used as a solvent. The four-probe method and the van der Pauw method were used to measure the electrophysical parameters of the films. **Results.** As a result of the experiments, the electrophysical parameters of the samples of transparent conductive oxides obtained under different technological conditions were determined. The dependences of the surface resistance and charge carrier mobility on the impurity concentration were plotted, which allowed us to analyze the scattering mechanisms present in oxide films. **Conclusions.** The theory was confirmed that scattering by ionized impurities in transparent conducting oxides is the main mechanism limiting the mobility of charge carriers. Critical values of the impurity concentration are established, with an increase in which the quality of the synthesized films deteriorates due to an increase in surface resistance and a decrease in the mobility of charge carriers. These conclusions were used in determining the optimal technological conditions.

К л ю ч е в ы е с л о в а: прозрачные проводящие оксиды, диоксид олова, метод спрей-пиролиза, механизмы рассеяния, поверхностное сопротивление, концентрация примеси, подвижность носителей заряда.

Key words: transparent conductive oxides, tin dioxide, spray pyrolysis method, scattering mechanisms, surface resistance, impurity concentration, charge carrier mobility.

Введение

К прозрачным проводящим оксидам (ППО) относятся тонкопленочные материалы (полупроводниковые оксиды металлов, полимеры, углеродные структуры), которым присуща высокая электропроводность, хорошая оптическая прозрачность. Наибольшее применение сегодня получили ППО на основе металлооксидов (MeO). Наибольшее распространение получили бинарные соединения (In₂O₃, ZnO, SnO₂ и CdO), в составе которых один металлический элемент. По стехиометрическому составу данные вещества являются диэлектриками, но по причине большого количества внутренних дефектов (дефекты обусловлены наличием кислородных вакансий, присутствием межузельных атомов металла) они способны становиться полупроводниками, обладающими широкой запрещенной зоной ($E_g > 3$ эВ). Поскольку энергия образования вакансий и атомов в междоузлии является низкой, то перечисленные дефекты легко формируются. В свою очередь, это является причиной относительно низкого сопротивления нестехиометрических металлооксидов.

Наиболее подходящим по технико-экономическим показателям методом получения подобных оксидных покрытий является метод спрей-пиролиза. Ему присущ ряд преимуществ, в том числе следующие: простота, низкая стоимость по сравнению с другими методами; возможность модификации свойств ППО посредством изменения технологических режимов; возможность нанесения покрытия большой площади; возможность массового производства как для нужд солнечной энергетики, так и «умных» стекол [1].

С целью достижения ППО высокой производительности необходимо добиться высоких значений проводимости пленок. Для этого необходимо всестороннее системное исследование процессов и физических эффектов, которые имеют место в оксидных пленках [2, 3]. Наиболее существенное влияние на проводимость оказывает рассеяние электронов. Несмотря на то, что исследования по изучению ППО проводятся учеными в течение многих лет, механизмы рассеяния, влияющие на их электрические свойства, до сих пор недостаточно изучены. Электрическое сопротивление обусловлено рассеянием электронов при взаимодействии с решеткой. По причине волновой природы электроны способны проходить сквозь совершенную решетку без затухания, поэтому удельное сопротивление является мерой совершенства структуры кристаллической решетки. В реальности, по ряду причин структура является несовершенной, поэтому электроны подвергаются рассеянию [4]. При этом среднее расстояние, которое электроны проходят между соударениями, характеризуется средним свободным пробегом. Даже если

решетка не имеет структурных дефектов вследствие тепловых колебаний атомов около своих средних положений, решетка не является совершенной для дрейфа электронов. Электроны взаимодействуют с различными видами колебаний решетки (фононами), что и обуславливает электросопротивление.

Экспериментальное получение пленок

Пленки SnO₂ синтезированы методом спрей-пиролиза, который на современном этапе развития технологий представляется одним из наиболее перспективных способов нанесения ППО на подложки большой площади.

Данный метод используется в основном для формирования тонких пленок простых оксидов металлов (ZnO, SnO₂, TiO₂, ZrO₂, и др.), имеющих широкое практическое применение в качестве прозрачных электропроводящих и антибликовых покрытий, чувствительных элементов газовых сенсоров, структур для оптоэлектроники, твердооксидных топливных элементов и фотоэлектрических преобразователей [5]. Кроме этого, можно получать спрей-пиролизом пленки смешанных оксидов (SrTiO₃, Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃), бинарных халькогенидов (CdS, CdSe, CdTe), сверхпроводящие оксидные пленки (YBa₂Cu₃O_{7-x}) [6, 7]. При использовании метода спрей-пиролиза формирование пленок происходит в результате термического разложения прекурсоров, которые содержатся в аэрозоле при его распылении на нагретую подложку [8].

В качестве подложек использованы натриево-кальциево-силикатные стекла. Предварительно подложки были очищены путем их ультразвуковой обработки в ацетоне, этаноле и дистиллированной воде. Нанесение пленок SnO₂ произведено из растворов, которые содержат тетрагидрид пентагидрат олова (SnCl₄·5H₂O) с молярной концентрацией C_M , в качестве растворителя использован этанол. Растворы с разными объемами V были распылены на подложки, нагретые до требуемой температуры. Значения концентрации примеси χ , а также технологических параметров C_M , V сведены в табл. 1. Распыление произведено с помощью сжатого воздуха, который был подан под давлением в пневматический распылитель.

Таблица 1

Значения технологических параметров при получении пленок SnO₂

Номер образца	χ , %	C_M , моль/л	V , мл
1	0	0,25	5
2			10
3			15
4			20
5	0,025		5
6			10
7			15
8	0,05		5
9			10
10			15

Методы измерения электрофизических параметров оксидных пленок

С целью измерения электрофизических параметров пленок SnO₂, нанесенных на стеклянные подложки, в данной работе использованы четырехзондовый метод и метод Ван дер Пау.

Четырехзондовый метод – наиболее распространен для измерения поверхностного сопротивления полупроводниковых материалов. Метод выбран в связи с высокими метрологическими показателями и простой схемой эксперимента. Принцип основан на явлении растекания электрического тока в точке контакта металлического острия с полупроводником. Поверхностное сопротивление определяется косвенно по результатам измерений разности потенциалов в двух точках, расположенных на плоской поверхности при пропускании тока

определенной величины через два точечных контакта, расположенных на рассматриваемой поверхности.

Остальные электрофизические параметры были получены методом Ван дер Пау, основная особенность которого заключается в способе измерения удельного электрического сопротивления. Ток пропускается через два соседних контакта в магнитном поле, а разность потенциалов измеряется между двумя другими. Сопротивление определяется косвенно по полученным данным. Затем процедура повторяется, но для других пар контактов и определяется сопротивление уже в другом направлении. Описанная методика применяется для измерения сопротивления как объемно легированных слоев, так и эпитаксиальных гетероструктур.

Анализ результатов измерения электрофизических параметров

В результате проведенных исследований определены электрофизические параметры прозрачных проводящих оксидов. Построены графики зависимостей поверхностного сопротивления, подвижности носителей заряда от концентрации примеси, что позволяет проанализировать механизмы рассеяния, присутствующие в оксидных пленках.

Проанализируем поверхностное сопротивление, измеренное двумя методами (четырёхзондовым и методом Ван дер Пау). Результаты измерений поверхностного сопротивления 15 образцов покрытий толщиной d представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений поверхностного сопротивления R_s
образцов покрытий толщиной d

Номер образца	d , нм	R_s , Ом/Г (4-зондовый метод)	R_s , Ом/Г (метод Ван дер Пау)	δ , %
1	115	1528	1463	4.4
2	133	861	841	2.4
3	168	675	667	1.2
4	209	637	624	2.1
5	211	426	445	4.3
6	245	139	145	4.1
7	262	89	92	3.3
8	225	221	216	4.5
9	260	95	96	1
10	270	57	59	3.4
11	275	28	27	3.7
12	210	262	268	2.3
13	255	106	110	3.6
14	263	71	74	4.1
15	271	58	60	3.3

Следует отметить, что результаты измерений, полученные 4-зондовым методом и методом Ван дер Пау, отличаются не более, чем на 4,5 %. Относительная погрешность составляет менее 5 %, за истинное значение принималось сопротивление, полученное методом Ван дер Пау. Также из таблицы видно, что сопротивление понижается при увеличении толщины покрытия. Такая зависимость объясняется «размерным эффектом», при котором происходит увеличение поверхностного рассеяния с уменьшением толщины по сравнению с объемным материалом.

В табл. 3 представлены электрофизические параметры, полученные методом Ван дер Пау. Получены данные электрофизические параметры, поскольку предоставляется возможность первичной оценки электрофизических свойств, а также возможности их улучшения. Основным параметром является проводимость, на которую прежде всего влияют подвижность и концентрация носителей заряда.

Таблица 3

Электrofизические параметры ППО, полученные методом Ван дер Пау

Номер образца	Удельное сопротивление, Ом·см	Удельная проводимость, $\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$	Подвижность носителей заряда, $\frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$	Объемная концентрация, см^{-3}	Поверхностная концентрация см^{-2}
1	$6,67 \cdot 10^{-3}$	150	13,25	$7,08 \cdot 10^{20}$	$7,08 \cdot 10^{14}$
2	$6,24 \cdot 10^{-3}$	160	11,34	$8,83 \cdot 10^{19}$	$8,83 \cdot 10^{15}$
3	$1,46 \cdot 10^{-2}$	68,4	8,03	$5,31 \cdot 10^{19}$	$5,31 \cdot 10^{14}$
4	$8,41 \cdot 10^{-3}$	119	9,15	$8,11 \cdot 10^{19}$	$8,11 \cdot 10^{14}$
5	$4,45 \cdot 10^{-3}$	225	12,24	$1,15 \cdot 10^{20}$	$1,15 \cdot 10^{15}$
6	$1,45 \cdot 10^{-3}$	692	14,75	$2,93 \cdot 10^{20}$	$2,93 \cdot 10^{15}$
7	$9,16 \cdot 10^{-4}$	1090	15,91	$4,33 \cdot 10^{20}$	$4,33 \cdot 10^{15}$
8	$2,16 \cdot 10^{-3}$	463	8,12	$3,56 \cdot 10^{20}$	$3,56 \cdot 10^{15}$
9	$9,56 \cdot 10^{-4}$	2240	7,41	$9,04 \cdot 10^{20}$	$9,04 \cdot 10^{15}$
10	$5,91 \cdot 10^{-4}$	1690	13,56	$7,79 \cdot 10^{20}$	$7,79 \cdot 10^{15}$
11	$2,74 \cdot 10^{-4}$	3650	9,78	$2,33 \cdot 10^{21}$	$2,33 \cdot 10^{16}$
12	$2,68 \cdot 10^{-3}$	374	6,34	$3,7 \cdot 10^{20}$	$3,7 \cdot 10^{15}$
13	$1,1 \cdot 10^{-3}$	907	6,31	$8,98 \cdot 10^{20}$	$8,98 \cdot 10^{15}$
14	$6,39 \cdot 10^{-4}$	1560	5,64	$1,73 \cdot 10^{21}$	$1,73 \cdot 10^{16}$
15	$6,02 \cdot 10^{-4}$	1661	4,83	$2,15 \cdot 10^{21}$	$2,15 \cdot 10^{16}$

Увеличение концентрации примеси приводит к уменьшению поверхностного сопротивления, т.е. к увеличению показателя проводимости (рис. 1).

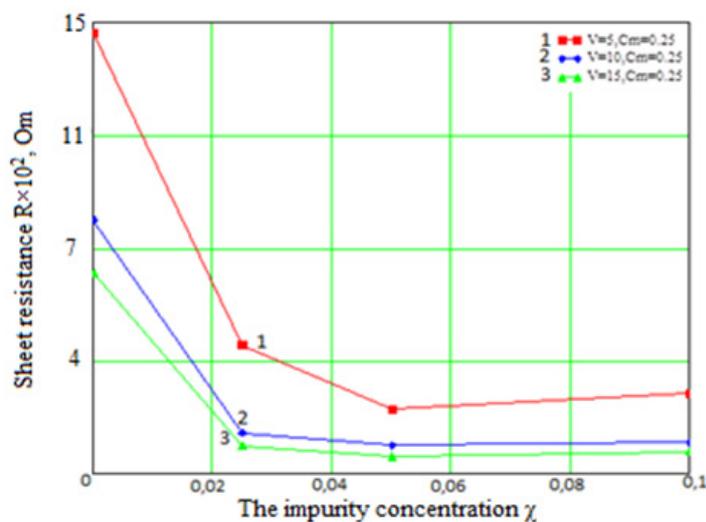


Рис. 1. Зависимость поверхностного сопротивления от концентрации примеси

При концентрации примеси менее 5 % от объема раствора наблюдается следующее: поверхностное сопротивление снижается с увеличением объема раствора, концентрации прекурсора и концентрации примеси. Поверхностное сопротивление уменьшается с увеличением концентрации примеси сурьмы. Сурьма замещает атомы олова в решетке, в результате чего атомы сурьмы являются донорами и создают избыточное количество свободных электронов. При достижении концентрации примеси 5 % и при ее дальнейшем росте, происходит некоторое увеличение поверхностного сопротивления оксидной пленки, что сказывается на удельном сопротивлении и, следовательно, на качестве покрытия. С точки зрения физических процессов это объясняется тем, что в ППО происходит рассеяние на ионизированных примесях, что выступает основным механизмом, ограничивающим подвижность носителей. Таким образом, при достижении конкретного значения концентрации (рассматриваемом случае, 5 %) свободные но-

сители заряда начинают мешать друг другу, примесные атомы встраиваются в кристаллическую решетку на неправильные позиции, что приводит к образованию дефектов. В результате появляется рассеяние на дефектах, увеличивается рассеяние на примесных атомах.

На подвижность носителей заряда концентрация носителей оказывает свое негативное влияние при достижении 2,5 % (рис. 2).

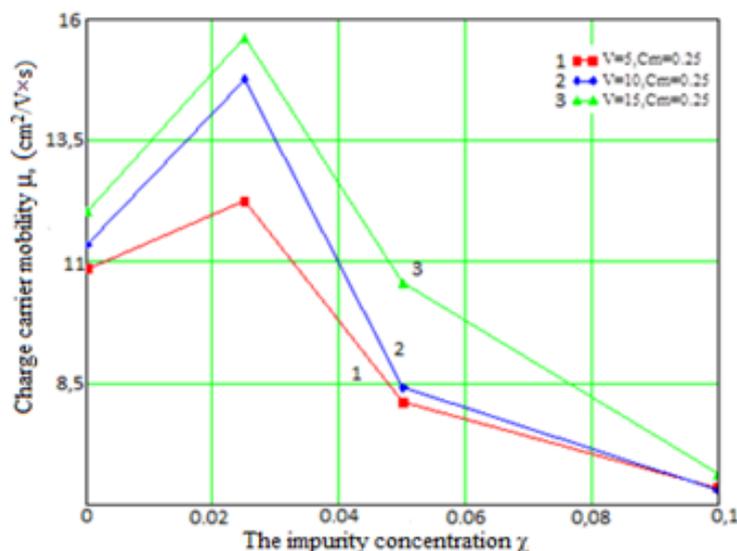


Рис. 2. Зависимость подвижности носителей заряда от концентрации примеси, при $V = 10$ мл, $V = 15$ мл и $V = 20$ мл

При концентрации примеси менее 2,5 % от объема раствора подвижность носителей заряда увеличивается. Это обусловлено резким увеличением количества носителей заряда, при этом рассеяние практически не оказывает влияния на подвижность носителей заряда (пик на графике, приведенном на рис. 2).

В случае достижения концентрации примеси 2,5 % и при ее дальнейшем росте имеет место увеличение рассеяния носителей заряда, из-за чего подвижность носителей заряда уменьшается. Это подтверждает теорию о том, что в ППО рассеяние на ионизированных примесях выступает основным механизмом, который ограничивает подвижность носителей заряда.

Заключение

В результате анализа электрофизических параметров пленок прозрачных проводящих оксидов установлено следующее:

- существует критическое значение концентрации примеси (составляет 5 %), при увеличении которого наблюдается рост поверхностного сопротивления оксидной пленки, что оказывает негативное влияние на поверхностное сопротивление;
- критическое значение концентрации примеси, свыше которого увеличение концентрации оказывает негативное влияние на подвижность носителей заряда, составляет 2,5 %;
- в ППО рассеяние на ионизированных примесях является основным механизмом, ограничивающим подвижность носителей.

Библиографический список

1. Кондрашин, В. И. Исследование влияния концентрации примеси на поверхностное сопротивление в ППП (полученных методом спрей-пиролиза) на основе диоксида олова / В. И. Кондрашин, Е. А. Печерская // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : сб. материалов 19-й Всерос. молод. науч. школы-семинара. – Ульяновск, 2016. – С. 175–176.
2. Electrical Properties Of Transparent Conductive Ato Coatings Obtained By Spray Pyrolysis / Т. О. Zinchenko, V. I. Kondrashin, E. A. Pecherskaya, A. S. Kozlyakov, K. O. Nikolaev, J. V. Shepeleva // Iop Conf. Series: Materials Science And Engineering. – 2017. – № 225. – P. 012255. – DOI 10.1088/1757-899x/225/1/012255.

3. *Raksha, S. V.* Функциональные материалы для сенсibilизированных красителем солнечных элементов / С. В. Ракша, В. И. Кондрашин, Е. А. Печерская, К. О. Николаев // *Физика и технология наноматериалов и структур* : сб. науч. ст. 2-й Междунар. науч.-практ. конф. – Курск : ЮЗГУ, 2015. – С. 143–146.
4. *Raksha, S. V.* Functional materials for dye-sensitized solar cells / S. V. Raksha, V. I. Kondrashin, E. A. Pecherskaya, K. O. Nikolaev // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. – 2015. – № 7 (4). – P. 04062.
5. *Ching-Prado, E.* Optical and electrical properties of fluorine doped tin oxide thin film / E. Ching-Prado, A. Watson, H. Miranda // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2018. – Vol. 29, iss. 18. – P. 15299–15306.
6. Синтез и свойства нанокристаллических пленок диоксида олова, полученных методом пиролиза аэрозолей / Р. М. Печерская, Е. А. Печерская, А. М. Метальников, В. И. Кондрашин, В. А. Соловьев // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. – 2012. – № 4 (24). – С. 237–241.
7. *Mamedov, H.* Электрические и фотоэлектрические свойства солнечных элементов SnO₂/Cd_{0.4}Zn_{0.6}S/CdTe, изготовленных электрохимическим методом / H. Mamedov // *Russian Physics and Technics of Semiconductors*. – 2006. – № 40. – P. 1476–1478.
8. *Zinchenko, T. O.* Анализ материалов, используемых для производства прозрачных проводящих покрытий / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская // *Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы* : сб. науч. ст. V Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. / под ред. Л. Р. Фионовой. – Пенза, 2018. – С. 256–258.

References

1. Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A. *Aktual'nye problemy fizicheskoy i funktsional'noy elektroniki: sb. materialov 19-y Vseros. molod. nauch. shkoly-seminara* [Actual problems of physical and functional electronics: collection of materials 19th all-Russian. young. science. school-seminar's.]. Ul'yanovsk, 2016, pp. 175–176. [In Russian]
2. Zinchenko T. O., Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A., Kozlyakov A. S., Nikolaev K. O., Shepeleva J. V. *Iop Conf. Series: Materials Science And Engineering*. 2017, no. 225, p. 012255. DOI 10.1088/1757-899x/225/1/012255.
3. Raksha S. V., Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A., Nikolaev K. O. *Fizika i tekhnologiya nanomaterialov i struktur: sb. nauch. st. 2-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Physics and technology of nanomaterials and structures: collection of scientific articles, 2nd international. scientific-practical conf.]. Kursk: YuZGU, 2015, pp. 143–146. [In Russian]
4. Raksha S. V., Kondrashin V. I., Pecherskaya E. A., Nikolaev K. O. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2015, no. 7 (4), p. 04062.
5. Ching-Prado E., Watson A., Miranda H. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2018, vol. 29, iss. 18, pp. 15299–15306.
6. Pecherskaya R. M., Pecherskaya E. A., Metal'nikov A. M., Kondrashin V. I., Solov'ev V. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* [News of higher educational institutions. Volga region. Physical and mathematical Sciences]. 2012, no. 4 (24), pp. 237–241. [In Russian]
7. Mamedov H. *Russian Physics and Technics of Semiconductors*. 2006, no. 40, pp. 1476–1478.
8. Zinchenko T. O., Pecherskaya E. A. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sb. nauch. st. V Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf.* [Information technologies in science and education. Problems and prospects: collection of scientific articles V vseros. inter-University. scientific-practical conf.]. Penza, 2018, pp. 256–258. [In Russian]

Зинченко Тимур Олегович

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: scar0243@gmail.com

Zinchenko Timur Olegovich

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Печерская Екатерина Анатольевна

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой информационно-измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: peal@list.ru

Pecherskaya Ekaterina Anatolevna

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

Кондрашин Владислав Игоревич

директор Центра молодежного
инновационного творчества «Парадигма»
(Россия, г. Пенза, ул. Кирова, 51)
E-mail: nauka-fpите@mail.ru

Kondrashin Vladislav Igorevich

director of Center for Youth Innovation Creativity
«Paradigma»
(51 Kirova street, Penza, Russia)

Спицына Ксения Юрьевна

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ksenya.kraynova.94@mail.ru

Spitsyna Kseniya Yur'evna

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Фимин Андрей Владимирович

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mr.l0tus@mail.ru

Fimin Andrey Vladimirovich

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Мельников Олег Андреевич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: oleg-068@mail.ru

Melnikov Oleg Andreevich

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Анализ электрофизических параметров пленок прозрачных проводящих оксидов / Т. О. Зинченко, Е. А. Печерская, В. И. Кондрашин, К. Ю. Спицына, А. В. Фимин, О. А. Мельников // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 1 (31). – С. 73–80. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-10.

П. Е. Голубков

**АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ
ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ
ПРИ УПРАВЛЯЕМОМ СИНТЕЗЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ
МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ**

P. E. Golubkov

**ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF THICKNESS
MEASUREMENT METHODS DIELECTRIC LAYERS
IN CONTROLLED SYNTHESIS PROTECTIVE COATINGS
BY MICRO-ARC METHOD OXYGENATING**

Аннотация. Актуальность и цели. Объектом исследования являются методы измерения толщины оксидных покрытий на металлических неферромагнитных подложках. Предметом исследования являются сущность и метрологические характеристики (диапазон измерения, погрешности) существующих методов измерения толщины оксидных покрытий на металлических неферромагнитных подложках. Целью работы является выбор метода измерения толщины оксидных слоев для непрерывного измерения и контроля толщины защитных покрытий, полученных микродуговым оксидированием (МДО), в процессе их управляемого синтеза. **Материалы и методы.** Для достижения поставленной цели используется системный подход для рассмотрения и анализа существующих методов измерения толщины оксидных покрытий и их метрологических характеристик. **Результаты.** Проведен аналитический обзор методов измерения толщины оксидных покрытий на металлических подложках, позволяющий определить наиболее приемлемый метод измерения толщины, удовлетворяющий предъявленным требованиям и учитывающий специфику процесса микродугового оксидирования. **Выводы.** Проведенный аналитический обзор позволяет заключить, что наиболее подходящими для измерения толщины оксидных покрытий в процессе микродугового оксидирования являются электрические методы, в частности, метод, использующий частотный интегрирующий развертывающий преобразователь (ЧИРП). Данный метод дает возможность с высокой точностью осуществлять непрерывные измерения толщины оксидных слоев непосредственно в процессе их формирования и может быть использован при разработке интеллектуальной автоматизированной системы управляемого синтеза МДО-покрытий.

Abstract. Background. The object of the study is methods for measuring the thickness of oxide coatings on metal non-ferromagnetic substrates. The subject of the study is the essence and metrological characteristics (measurement range, errors) of existing methods for measuring the thickness of oxide coatings on metal non-ferromagnetic substrates. The purpose of this work is to select a method for measuring the thickness of oxide layers for continuous measurement and control of the thickness of protective coatings obtained by micro-arc oxidation (MAO) during their controlled synthesis. **Materials and methods.** To achieve this goal, a systematic approach is used to review and analyze existing methods for measuring the thickness of oxide coatings and their metrological characteristics. **Results.** An analytical review of methods for measuring

the thickness of oxide coatings on metal substrates is carried out, which allows us to determine the most appropriate method for measuring the thickness that meets the requirements and takes into account the specificity of the micro-arc oxidation process. **Conclusions.** The analytical review allows us to conclude that the most suitable methods for measuring the oxide coatings thickness in the process of micro-arc oxidation are electrical methods, in particular, the method using a frequency integrating scanning converter (FISC). This method makes it possible to carry out continuous measurements of the thickness of oxide layers directly in the process of their forming with high accuracy and can be used in the development of an intelligent automated system for the controlled synthesis of MAO coatings.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, методы измерения толщины, диапазон измерения, погрешность, автоматизированный управляемый синтез.

Keywords: micro-arc oxidation, thickness measurement methods, measurement range, error, automated controlled synthesis.

Введение

В настоящее время оксидные покрытия со специальными свойствами (высокая микротвердость, износостойкость, коррозионная стойкость, жаростойкость и т.д.), полученные методом микродугового оксидирования (МДО), востребованы во многих отраслях промышленности и народного хозяйства [1–4]. Появляются новые применения этих покрытий, такие как чувствительные к радиоактивному излучению слои и антибактериальные биосовместимые покрытия для костных имплантов и т.п. [5, 6]. В России и мире существуют уже порядка 10 компаний, применяющих данную технологию, однако ее широкое внедрение в промышленность в настоящее время все еще затруднено, поскольку большое количество одновременно влияющих разнородных факторов создают препятствие для эффективного управления процессом МДО и его автоматизации [7–9]. Тем не менее учеными и инженерами ведется непрерывная работа по устранению этого недостатка и совершенствованию технологического оборудования [10–13], для чего в последнее время все чаще применяются интеллектуальные алгоритмы [14, 15]. Так, в работах [16–18] предложена концепция построения интеллектуальной автоматизированной системы управляемого синтеза МДО-покрытий, в основе которой лежит использование интеллектуального алгоритма, позволяющего по измеренным в реальном времени значениям технологических параметров и свойств оксидных покрытий контролировать и корректировать их отклонение от заданных значений, в связи с чем возникает необходимость разработки соответствующих средств измерения. В данной работе проведен аналитический обзор методов измерения толщины диэлектрических покрытий на металлической подложке с целью выбора наиболее подходящего из них для разработки измерительного преобразователя толщины МДО-покрытий интеллектуальной автоматизированной системы управляемого синтеза.

Аналитический обзор методов измерения толщины диэлектрических покрытий на металлической подложке

Покрытия, получаемые микродуговым оксидированием, представляют собой слой оксида металла основы (алюминий, титан, магний и другие вентильные металлы) на подложке из этого металла. Рассмотрим существующие методы измерения толщины таких покрытий с учетом следующих требований:

- возможность измерения в режиме реального времени;
- возможность проводить измерения толщины покрытий во время их формирования, т.е. не вынимая деталь из гальванической ячейки и не выключая источник технологического тока;
- диапазон измеряемых толщин должен составлять от 1 до 300 мкм;
- погрешность измерения толщины должна составлять не более 1 %.

Существуют несколько методов измерения толщины диэлектрических покрытий на металлической подложке:

- вихретоковый метод;
- термографический метод;
- радиометрический метод β -отражения;

- ультразвуковые методы: эхо-импульсный и резонансный;
- оптические методы: поляризационный; интерференционный; колориметрический; метод светового сечения; метод теневого сечения;
- электрические методы: зондовые методы; емкостной метод; методы измерения толщины, использующие измерительные мосты и делители напряжения.

1. Вихретоковый метод измерения толщины (рис. 1) основан на взаимодействии материала покрытия с токами высокой частоты (вихревыми токами). Исследуемый образец помещают под катушку индуктивности, питаемую переменным током. При этом в металле основы наводятся вихревые токи, которые посредством электромагнитной индукции влияют на первичный ток катушки. Это изменение первичного тока зависит от электрических и магнитных свойств материала основы и покрытия, а также от их геометрических размеров, в частности, толщины. Данный метод позволяет определять толщину диэлектрических покрытий на ферромагнитной проводящей подложке в диапазоне от 0 до 500 мкм.

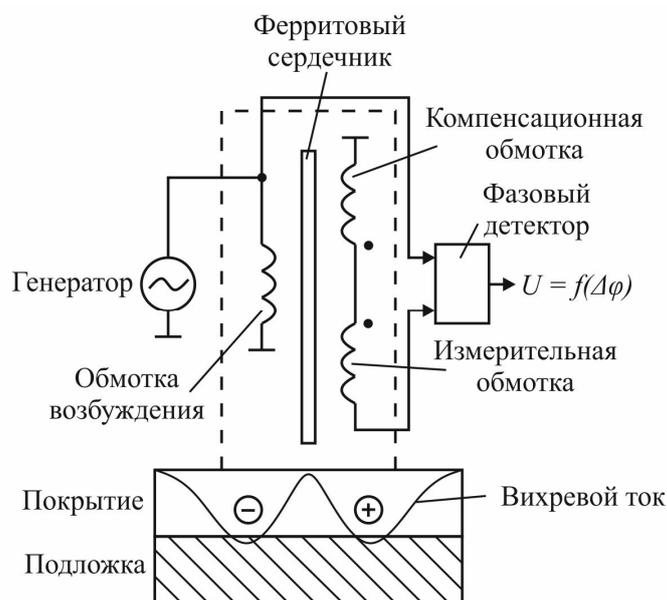


Рис. 1. Структурная схема вихретокового измерительного преобразователя толщины покрытий

Основная погрешность вихретоковых толщиномеров составляет 3 %. Данный метод применяется для исследования готовых образцов с МДО-покрытиями, но он непригоден для измерения толщины этих покрытий в процессе их формирования, так как позволяет осуществлять только дискретные измерения.

2. Термографический метод определения толщины (рис. 2) основан на измерении параметров тепловых полей исследуемых образцов.

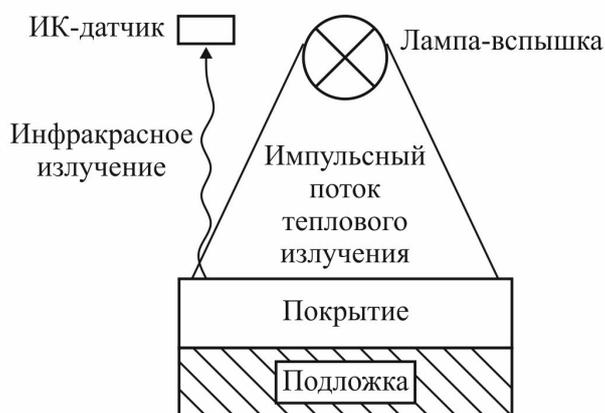


Рис. 2. Принцип измерения толщины покрытий термографическим методом

Образец с покрытием подвергается импульсному нагреву с помощью мощной лампы-вспышки. Поглощенная образцом энергия преобразуется в тепловое излучение, которое детектируется ИК-датчиком. Путем сравнения интенсивностей ИК-излучения от подложки и от образца с покрытием получают интенсивность теплового излучения покрытия, которая зависит от его геометрических параметров, в том числе толщины.

Диапазон измерения толщины диэлектрических покрытий на металлических подложках составляет от нескольких микрометров до 1 мм. Недостатком метода является зависимость результата измерений от теплофизических (теплопроводность, плотность, отражающая способность и др.) и геометрических (шероховатость поверхности) параметров покрытия, а также от адгезии покрытия к подложке. Метод неприменим для измерений в процессе МДО, поскольку вспышки микроразрядов в покрытии сами являются источником тепла, разогревающего как электролит, так и оксидный слой, что приводит к увеличению погрешности.

Радиометрический метод β -отражения (метод обратного рассеяния). Структурная схема измерительного преобразователя, реализующего данный метод, представлена на рис. 3.

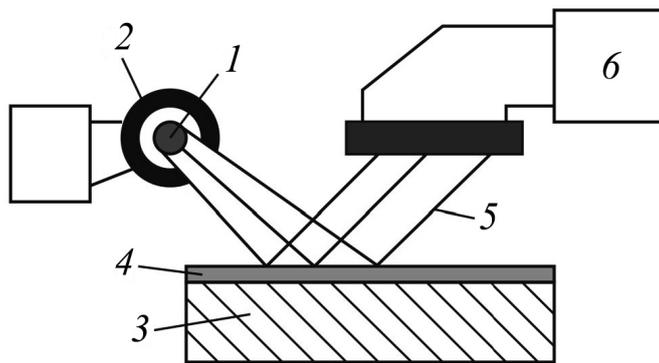


Рис. 3. Структурная схема измерительного преобразователя

Источник β -излучения 1 (радиоактивный изотоп) через отверстие в камере 2 облучает образец 3 с покрытием 4, а отраженное излучение 5 фиксируется приемником 6 (счетчиком Гейгера). При этом доля частиц, отраженных под углом 180° (интенсивность обратного рассеяния), используется в качестве меры толщины покрытия. При постоянной геометрии датчиков и использовании одного и того же источника излучения интенсивность обратного рассеяния I_{obr} зависит от порядкового номера вещества в таблице Менделеева и толщины рассеивающего слоя d_s :

$$I_{obr} = I_n (1 - \exp(-m_r d_s)), \quad (1)$$

где I_n – интенсивность насыщения (интенсивность падающего пучка частиц), m_r – коэффициент обратного рассеяния.

Радиометрический метод позволяет измерять толщину как металлических, так и диэлектрических покрытий на металлических и диэлектрических подложках в диапазоне от сотых долей до сотен микрометров. Мешающими параметрами для измерения толщины данным методом являются плотность и атомный номер материалов покрытия и подложки, шероховатость их поверхности, но самым главным недостатком данного метода является использование радиоактивных изотопов, что представляет опасность для человека [19].

Ультразвуковые методы измерения толщины основаны на использовании различных акустических эффектов, возникающих при прохождении ультразвуковых колебаний через исследуемую среду. Существуют два акустических метода: эхо-импульсный и резонансный. В первом из них источник ультразвуковых колебаний посылает импульс на контролируемую поверхность, а сигнал, отраженный от границы раздела «покрытие – подложка», регистрируется приемником. Толщина покрытия определяется по времени прохождения ультразвуковой волны в покрытии до границы с материалом основы, имеющим другие упругие свойства. Резонансный метод основан на измерении свободных колебаний (резонанса) в образце и использовании интерференции звуковых волн.

Диапазон измерения толщины покрытий ультразвуковыми толщиномерами – от 100 мкм и выше. Неоспоримым преимуществом данных приборов является возможность измерения толщины покрытий в труднодоступных местах или в изделиях замкнутого типа (трубы, сосуды), однако в гальваническом производстве данный метод не нашел широкого применения в связи с большим значением минимальной измеряемой толщины покрытия. Основная погрешность ультразвуковых методов измерения толщины составляет 1–2 %, большой вклад в которую вносит методическая погрешность, обусловленная различием скорости звука в разных объектах и погрешность нелинейности.

Оптические методы. К ним относятся: поляризационный (эллипсометрический) метод, интерференционные методы, методы светового и теневого сечения.

Поляризационный метод измерения толщины. Для исследования анодных оксидных слоев применяются методы отражательной эллипсометрии. При этом падающий линейно-поляризованный свет отражается от поверхности образца; отраженный луч, имеющий эллиптическую поляризацию, фиксируется приемником излучения (рис. 4).

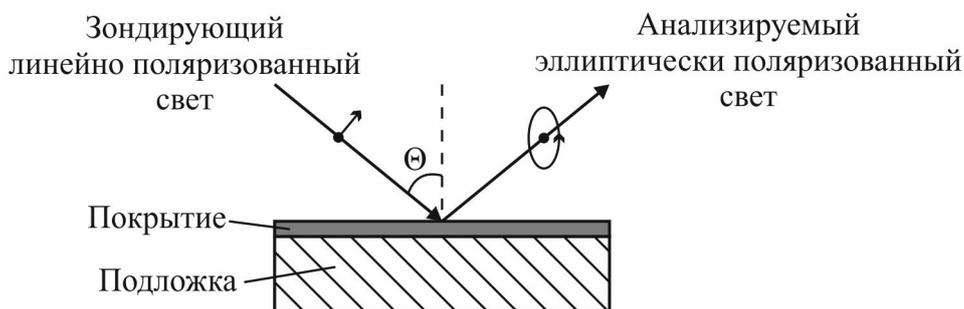


Рис. 4. Принцип измерения толщины покрытия эллипсометрическим методом

Изменение параметров эллипса поляризации при отражении характеризуется коэффициентами Френеля R_p и R_s и эллипсометрическими углами (параметрами) Δ и Ψ , связанными между собой основным уравнением эллипсометрии

$$\rho = \frac{R_p}{R_s} = \operatorname{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta}, \quad (2)$$

где ρ – относительный коэффициент отражения поляризованного излучения.

Величины Ψ и Δ зависят от характеристик отражающей поверхности и измеряются с помощью эллипсометров. Если на поверхности образца имеется пленка, то его эллипсометрические параметры изменяются, что связано с многократным отражением света на границах разделов пленка – внешняя среда и пленка – подложка и последующей интерференцией отраженных лучей.

Методом эллипсометрии в видимой области проводятся измерения толщин слоя с погрешностью (3–5) % в диапазоне толщин от 10 до 1000 нм и 0,5 % в диапазоне толщин от 1 до 10 нм. Описанные погрешности являются инструментальными и связаны с погрешностью измерения азимутальных углов и несовершенством оптических элементов эллипсометра.

Эллипсометрический метод измерения используется для определения тонких оксидных слоев, вследствие чего оказывается неприменимым для МДО-покрытий, поскольку их толщина составляет до 300 мкм.

Интерференционный метод основан на явлении интерференции лучей, отраженных от внешней и внутренней границ покрытия (рис. 5). При этом толщину покрытия d можно найти по выражению

$$d = \frac{\beta \lambda}{2\pi \sqrt{N_1^2 - \sin^2(\varphi_0)}}, \quad (3)$$

где β – сдвиг фаз; λ – длина волны в вакууме; N_1 – комплексный показатель преломления оксидной пленки; φ_0 – угол падения лучей. Данный метод позволяет определять толщину пленки с точностью до 0,1 нм [20].

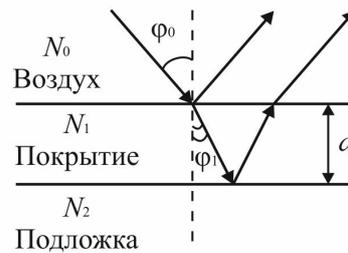


Рис. 5. Ход лучей в образце

Существует две разновидности интерференционного метода измерения толщины. Для первой из них требуется наличие микрорельефа (ступеньки) на поверхности детали. При попадании луча на ступеньку интерференционная картина искажается и происходит смещение интерференционных полос, по которому можно определить высоту ступеньки (рис. 6,а). При работе в белом свете искривление в одну интерференционную полосу соответствует высоте неровности на исследуемой поверхности, равной 0,27 мкм. Для измерения толщины данным методом используются микроинтерферометры (рис. 6,б).

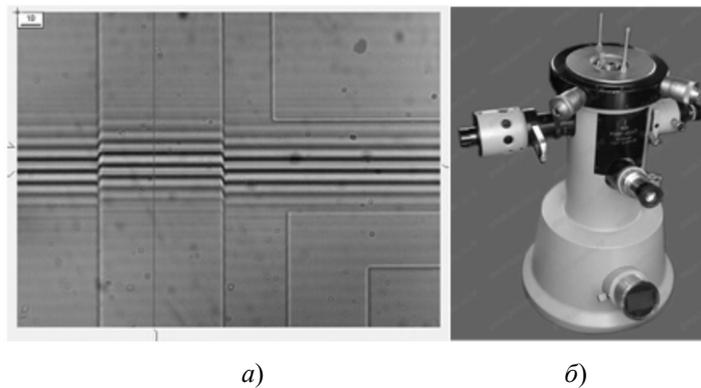


Рис. 6. Интерференционный метод измерения толщины:
а – искажение интерференционной картины на неровностях поверхности; б – микроинтерферометр

Диапазон измерения толщины данным методом составляет 0,03 до 2,2 мкм.

Вторая разновидность – колориметрический метод – основана на явлении изменения цвета при интерференции лучей, отраженных от внешней и внутренней поверхности покрытия. Толщину покрытия при измерениях данным методом определяют с помощью специальных таблиц. Недостатком метода является большая субъективная погрешность (до 90 %), а также малая толщина измеряемых пленок.

Метод светового сечения. Свет от источника излучения проходит через узкую прямоугольную щель, изображение которой попадает на образец под некоторым углом α . Направление падения (1) и отражения света от поверхностей детали (2а) и покрытия (2б) показаны на рис. 7. В поле зрения микроскопа по оси 2а и 2б оказываются два изображения щели, отраженные от плоскостей АА и ББ и смещенные относительно друг друга на расстояние b , пропорциональное толщине покрытия (рис. 8).

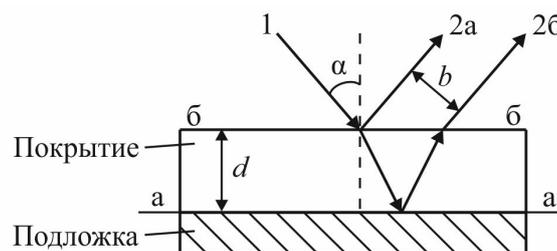


Рис. 7. Принцип измерения толщины прозрачного покрытия методом светового сечения

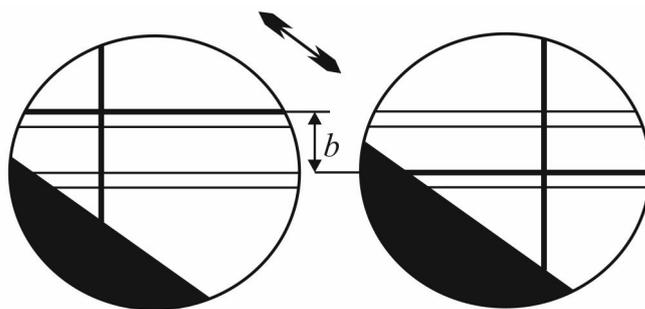


Рис. 8. Вид поля зрения микроскопа при измерении толщины покрытия методом светового сечения:
 b – расстояние между изображениями щели

Далее с помощью окуляр-микрометра измеряются величины b последовательным наведением перекрестия окуляр-микрометра на наиболее четкие края изображения щели и производится отсчет показаний в этих точках, после чего находится их разность. Для прозрачного покрытия толщину h можно вычислить по формуле

$$h = \frac{b}{V_{ob} \sqrt{2}} \cdot \sqrt{2n-1}, \quad (4)$$

где V_{ob} – увеличение объектива микроскопа; n – показатель преломления пленки.

Диапазон толщин покрытий, измеряемых данным методом, составляет от 0,8 до 720 мкм. Метод позволяет проводить только дискретные измерения.

Метод теневого сечения является модификацией метода светового сечения и отличается от него тем, что оператор наблюдает не освещенное изображение щели, а тень от этого изображения. При этом на поверхности образца обязательно должна быть ступенька, по высоте равная толщине покрытия. Для получения тени на высоте 0,1 мм над опорной плоскостью располагают нож. Пучок лучей, прошедший через щель, встречает на своем пути нож, который срезает часть пучка; оставшаяся часть пучка падает на поверхность образца под углом 45° (рис. 9,а).

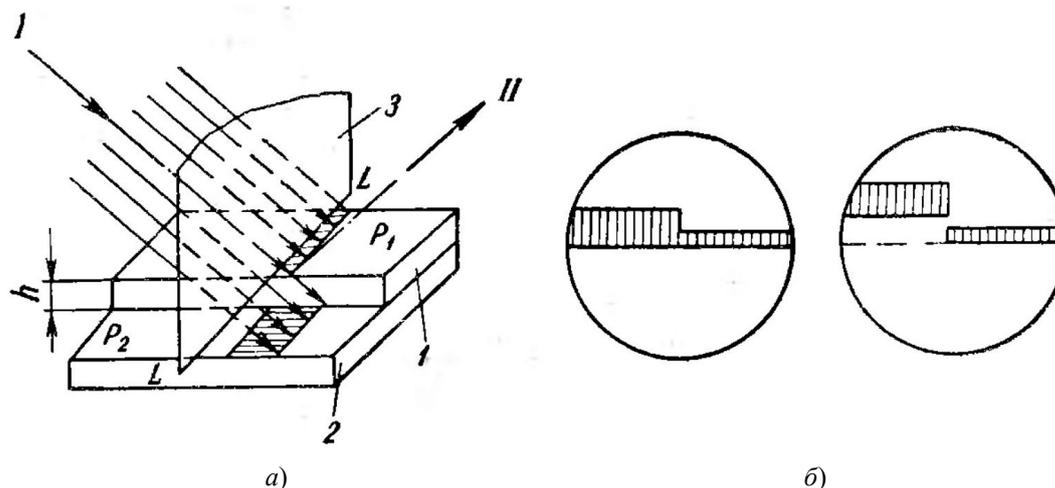


Рис. 9. Метод теневого сечения:
 а – принцип измерения; б – вид поля зрения микроскопа

В поле зрения микроскопа при этом будет виден смещенный край щели по отношению к кромке ножа (рис. 9,б). Расстояние между изображениями проекций лезвия ножа на обеих частях уступа является мерой толщины покрытия (высоты уступа).

Диапазон толщин покрытия, измеряемых методом теневого сечения, – от 40 до 320 мкм. Недостатком данного метода является необходимость формирования ступеньки на поверхности образца и, как и у предыдущего метода, невозможность непрерывного измерения.

Электрические методы измерения толщины. Основными физическими величинами, пригодными для измерения толщины покрытий электрическими методами, являются сопротивление, емкость и резонансная частота.

Одним из возможных вариантов измерения толщины покрытия по сопротивлению образца с покрытием является четырехзондовый метод. К поверхности образца подводятся четыре зонда – два токовых и два потенциальных. Через токовые зонды пропускается электрический ток I , а падение напряжения на образце U измеряется между потенциальными зондами. Толщина покрытия d при этом рассчитывается по формуле

$$d = \frac{\rho I}{U}, \quad (5)$$

где ρ – удельное объемное сопротивление покрытия.

Суммарная погрешность измерения толщины оксидных пленок на алюминии четырехзондовым методом составляет $\pm 15\%$. Данный метод позволяет проводить только дискретные измерения, что является его недостатком.

При измерении толщины емкостным методом используется зависимость резонансной частоты колебательного контура от емкости конденсатора. Конденсатор, состоящий из образца (металлическая подложка с исследуемым покрытием) и измерительного электрода, включается в колебательный контур с катушкой индуктивности, на вход которого подключается генератор сигналов переменного тока, а на выход – частотомер для измерения резонансной частоты (рис. 10). Толщина покрытия d при этом пропорциональна квадрату резонансной частоты колебательного контура

$$d = 4\pi^2 L \varepsilon \varepsilon_0 S f_0^2, \quad (6)$$

где L – индуктивность катушки; ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; ε_0 – диэлектрическая постоянная; S – площадь обкладок конденсатора; f_0 – резонансная частота.

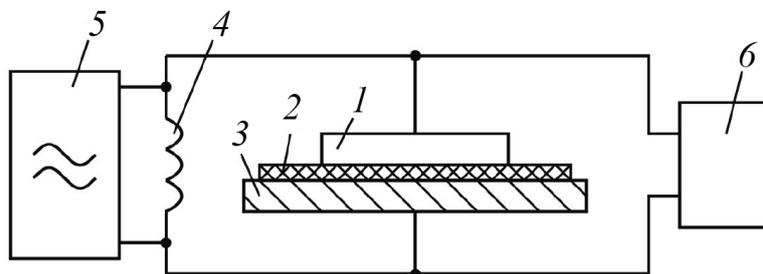


Рис. 10. Устройство для измерения толщины покрытий емкостным методом:
1 – измерительный электрод; 2 – диэлектрическое покрытие; 3 – металлическая подложка;
4 – катушка индуктивности; 5 – генератор сигналов; 6 – частотомер

Также для измерения толщины применяются измерительные мосты и делители напряжения. Измерение толщины мостовым методом осуществляется путем уравнивания измерительного моста, далее из условия равновесия выражается неизвестное комплексное сопротивление, из которого выражается толщина диэлектрика d .

Одним из вариантов электрических методов измерения толщины покрытий, использующих конденсаторный делитель напряжения, является метод частотного интегрирующего развертывающего преобразователя (ЧИРП), разработанный специально для процесса МДО [21]. Структура измерительного канала толщины покрытия данным методом представлена на рис. 11.

Металлический образец с оксидным покрытием и измерительный электрод, расположенный на расстоянии d от него, образуют исследуемый конденсатор, который служит нижним плечом делителя. Верхним плечом делителя служит образцовый конденсатор C_0 с известной емкостью. Делитель подключен к частотному интегрирующему развертывающему преобразователю, который служит для преобразования емкости в частоту согласно выражению

$$f_{out} = \frac{1}{4R_0C_d} + \left(\frac{C_{eq} - C_0}{C_0 + C_{eq}} \right) \cdot \frac{1}{4R_iC_d} = f_0 + \Delta f, \quad (7)$$

где C_{eq} – емкость исследуемого конденсатора, C_d , R_0 , R_i – параметры компонентов интегральной схемы ЧИРП, f_0 – начальная частота, Δf – девиация частоты (если $C_{eq} < C_0$, f_{out} уменьшается, а когда $C_{eq} > C_0$ – увеличивается) (рис. 12).

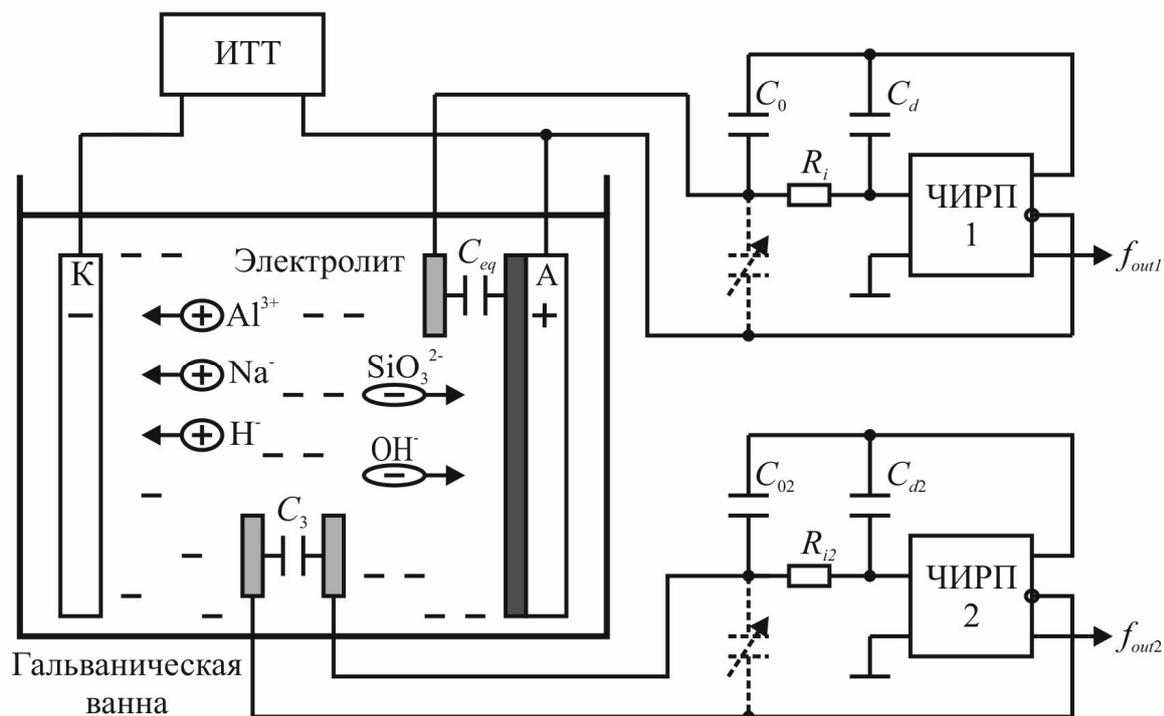


Рис. 11. Структура измерительного канала толщины МДО-покрытия: ИТТ – источник технологического тока; А – анод; К – катод; ЧИРП – частотный интегрирующий развертывающий преобразователь

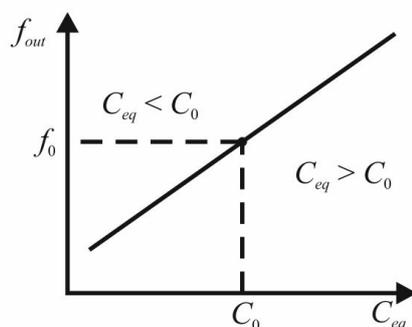


Рис. 12. Зависимость частоты выходных импульсов ЧИРП от емкости исследуемого образца C_{eq}

Толщина покрытия d_1 рассчитывается по следующей формуле:

$$d_1 = \left(\frac{1}{C_{eq}} - \frac{1}{C_3} \right) \cdot \frac{1}{S_{dc}}, \quad (8)$$

где S_{dc} – чувствительность первичного преобразователя (исследуемый конденсатор); C_3 – емкость конденсатора с электролитом в качестве диэлектрика и имеющего такие же геометрические параметры, как и исследуемый конденсатор. Емкость C_3 измеряется в процессе МДО с помощью второго модуля ЧИРП.

Диапазон измерения толщины данным методом составляет от 0 до 300 мкм, а погрешность не превышает 1%. Неоспоримым достоинством данного метода является возможность непрерывного измерения толщины покрытия непосредственно во время МДО-обработки.

Заключение

В настоящее время существует большое количество методов измерения толщины диэлектрических пленок на металлических подложках, однако по разным причинам не все из них удовлетворяют предъявляемым для процесса микродугового оксидирования требованиям. Наиболее приемлемыми для использования в интеллектуальной автоматизированной системе управляемого синтеза МДО-покрытий представляются электрические методы, например, емкостной метод и особенно метод ЧИРП, учитывающий специфику процесса МДО. Применение данного метода позволит не только получить наиболее точные и достоверные зависимости толщины оксидных слоев от технологических параметров, но и обеспечить ее непрерывный контроль в течение всей МДО-обработки.

Библиографический список

1. *Казанцев, И. А.* Технология получения композиционных материалов микродуговым оксидированием : монография / И. А. Казанцев, А. О. Кривенков. – Пенза : ИИЦ ПГУ, 2007. – 240 с.
2. Improving wear and corrosion properties of alumina coating on AA7075 aluminum by plasma electrolytic oxidation: Effects of graphite absorption / В. Haghghat-Shishavan, R. Azari-Khosrowshahi, S. Haghghat-Shishavan, M. Nazarian-Samani, N. Parvini-Ahmadi // *Applied Surface Science*. – 2019. – Vol. 481. – P. 108–119.
3. Применение в изделиях медицинской техники покрытий, полученных методом микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, К. Ю. Крайнова, М. И. Сафронов, Е. А. Печерская, А. М. Бибарсова // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы (ВМНПК – 2019) : материалы VI Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. (13 марта 2019 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. – С. 184–186.
4. *Шаркеев, Ю. П.* Биоконпозиты на основе кальцийфосфатных покрытий, наноструктурных и ультрамелкозернистых биоинертных металлов, их биосовместимость и биодegradация / Ю. П. Шаркеев, С. Г. Псахье, Е. В. Легостаева ; отв. ред. Н. З. Ляхов. – Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. – 596 с.
5. One-Step Synthesis of Antibacterial Coatings by Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminum / J. S. Santos, A. Rodrigues, A. P. Simon, C. H. Ferreira, V. A. Q. Santos, M. S. Sikora, N. C. Cruz, G. P. Mambriani, F. Trivinho-Strixino // *Advanced Engineering Materials*. – 2019. – Vol. 21. – P. 1–6, 1900119.
6. Thermostimulated luminescence of plasma electrolytic oxidation coatings on 6082 aluminium surface / A. Zolotarjovs, K. Smits, K. Laganovska, I. Bite, L. Grigorjeva, K. Auzins, D. Millers, L. Skuja // *Radiation Measurements*. – 2019. – Vol. 124. – P. 29–34.
7. *Михеев, А. Е.* Разработка функциональной схемы влияния основных факторов процесса микродугового оксидирования на свойства покрытий / А. Е. Михеев, Т. В. Трушкина, А. В. Гирн, Д. В. Раводина // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени акад. М. Ф. Решетнева. – 2015. – № 16 (2). – С. 464–469.
8. Взаимосвязи технологических параметров процесса микродугового оксидирования и свойств оксидных покрытий / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Д. В. Артамонов, М. И. Сафронов, А. В. Печерский // Технологии микро- и наноэлектроники в микро- и наносистемной технике : материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф. (20–22 февраля 2019 г.). – Москва, 2019. – С. 140–143.
9. Исследование влияния технологических параметров процесса микродугового оксидирования на свойства оксидных покрытий / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Д. В. Артамонов, М. И. Сафронов, А. В. Печерский // Известия вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 363–369.
10. *Borikov, V. N.* Virtual measurement system of electric parameters of microplasma processes / V. N. Borikov, P. F. Baranov, A. D. Bezshlyakh // *SIBCON-2009: Proc.* – 2009. – P. 275–279.
11. *Bolshenko, A. V.* Power Supplies for Microarc Oxidation Devices / A. V. Bolshenko, A. V. Pavlenko, V. S. Puzin, I. N. Panenko // *Life Science Journal*. – 2014. – Vol. 11 (1s). – P. 263–268.
12. *Мамаев, А. И.* Формирование наноструктурных неметаллических неорганических покрытий путем локализации высокоэнергетических потоков на границе раздела фаз : учеб. пособие / А. И. Мамаев, В. А. Мамаева, В. Н. Бориков, Т. И. Дорофеева. – Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2010. – 360 с.
13. *Голубков, П. Е.* Методы измерения температуры в процессе микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, А. В. Мартынов, Е. А. Печерская // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы (ВМНПК – 2018) : сб. науч. ст. V Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. (14 марта 2018 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. – С. 245–248.
14. *Borikov, V.* Neural method alloys identification by the microplasma oxidation process in the electrolyte solutions / V. Borikov // *Materialwiss. Werkstofftech.* – 2006. – Vol. 37. – P. 915–918.
15. Реализация поддержки принятия решений в управлении процессом микродугового оксидирования на базе искусственных нейронных сетей / В. В. Ломакин, Т. В. Зайцева, Н. П. Путивцева,

- В. М. Яценко, О. П. Пусная // Научные ведомости. Сер.: Экономика. Информатика. – 2016. – Вып. 40, № 23 (244). – С. 124–133.
16. Автоматизированная исследовательская технологическая установка микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, Е. А. Печерская, О. В. Карпанин, Ю. В. Шепелева, Т. О. Зинченко, Д. В. Артамонов // Наноструктурированные оксидные пленки и покрытия : материалы IV Междунар. молодежной науч. школы-семинара (9–12 октября 2017 г.). – Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2017. – С. 103–114.
 17. Интеллектуальная система управляемого синтеза оксидных покрытий / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Г. В. Козлов, А. В. Печерский // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2. – С. 99–108.
 18. Алгоритм функционирования интеллектуальной системы синтеза оксидных покрытий / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Д. В. Артамонов, А. М. Бибарсова, А. В. Лысенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2. – С. 85–94.
 19. Сясько, В. А. Перспективные методы измерения толщины защитных покрытий. Проблемы методов и метрологического обеспечения / В. А. Сясько, С. С. Голубев, Н. И. Смирнова // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : МГОУ ВО «Белорусско-Российский университет», 2017. – С. 30–39.
 20. Королев, А. П. Определение толщины пленки Al₂O₃ на холодных катодах оптическим методом / А. П. Королев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 683–687.
 21. Метод измерения толщины оксидного покрытия в процессе микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, Е. А. Печерская, Н. В. Громков, Т. О. Зинченко, Д. В. Артамонов, И. И. Кочегаров // SCM-2019 : материалы Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2019. – Т. 1. – С. 300–303.

References

1. Kazantsev I. A., Krivenkov A. O. *Tekhnologiya polucheniya kompozitsionnykh materialov mikrodugovym oksidirovaniem: monografiya* [Technology of production of composite materials of micro-arc oxidation : monograph]. Penza: IITs PGU, 2007, 240 p. [In Russian]
2. Haghghat-Shishavan B., Azari-Khosrowshahi R., Haghghat-Shishavan S., Nazarian-Samani M., Parvini-Ahmadi N. *Applied Surface Science*. 2019, vol. 481, pp. 108–119.
3. Golubkov P. E., Kraynova K. Yu., Safronov M. I., Pecherskaya E. A., Bibarsova A. M. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy (VMNPK – 2019): materialy VI Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. (13 marta 2019 g.)* [Information technologies in science and education. Problems and prospects (MNPK – 2019) : materials of the VI all-Russia. inter-University. scientific-practical Conf. (March 13, 2019)]. Penza: Izd-vo PGU, 2019, pp. 184–186. [In Russian]
4. Sharkeev Yu. P., Psakh'e S. G., Legostaeva E. V. *Biokompozity na osnove kal'tsiyfosfatnykh pokrytiy, nanostrukturnykh i ul'tramelkozernistykh bioinertnykh metallov, ikh biosovmestimost' i biodegradatsiya* [Biocomposites based on calcium phosphate coatings, nanostructured and ultrafine-grained bioinert metals, their biocompatibility and biodegradation]. Tomsk: Izdatel'skiy Dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2014, 596 p. [In Russian]
5. Santos J. S., Rodrigues A., Simon A. P., Ferreira C. H., Santos V. A. Q., Sikora M. S., Cruz N. C., Mambri G. P., Trivinho-Strixino F. *Advanced Engineering Materials*. 2019, vol. 21, pp. 1–6, 1900119.
6. Zolotarjovs A., Smits K., Laganovska K., Bite I., Grigorjeva L., Auzins K., Millers D., Skuja L. *Radiation Measurements*. 2019, vol. 124, pp. 29–34.
7. Mikheev A. E., Trushkina T. V., Girm A. V., Ravodina D. V. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akad. M. F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian state aerospace University named after akad. M. F. Reshetneva]. 2015, no. 16 (2), pp. 464–469. [In Russian]
8. Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Artamonov D. V., Safronov M. I., Pecherskiy A. V. *Tekhnologii mikro- i nanoelektroniki v mikro- i nanosistemnoy tekhnike: materialy 6-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (20–22 fevralya 2019 g.)* [Technologies of micro- and nanoelectronics in micro- and nanosystem engineering: materials of the 6th international conference. scientific and technical Conf. (February 20–22, 2019)]. Moscow, 2019, pp. 140–143. [In Russian]
9. Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Artamonov D. V., Safronov M. I., Pecherskiy A. V. *Izvestiya vuzov. Elektronika* [University news. Electronics]. 2019, vol. 24, no. 4, pp. 363–369. [In Russian]
10. Borikov V. N., Baranov P. F., Bezshlyakh A. D. *SIBCON-2009: Proc.* 2009, pp. 275–279.
11. Bolshenko A. V., Pavlenko A. V., Puzin V. S., Panenko I. N. *Life Science Journal*. 2014, vol. 11 (1s), pp. 263–268.
12. Mamaev A. I., Mamaeva V. A., Borikov V. N., Dorofeeva T. I. *Formirovanie nanostrukturnykh nemetallicheskiykh neorganicheskikh pokrytiy putem lokalizatsii vysokoenergeticheskikh potokov na granitse razdela faz: ucheb. posobie* [Formation of nanostructured non-metallic inorganic coatings by localization

- of high-energy flows at the phase interface: textbook. stipend]. Tomsk: Izd-vo Tomsk. un-ta, 2010, 360 p. [In Russian]
13. Golubkov P. E., Martynov A. V., Pecherskaya E. A. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy (VMNPK – 2018): sb. nauch. st. V Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. (14 marta 2018 g.)* [Information technologies in science and education. Problems and prospects (VMNPC-2018): collection of scientific articles V vseros. inter-University. scientific-practical Conf. (March 14, 2018)]. Penza: Izd-vo PGU, 2018, pp. 245–248. [In Russian]
 14. Borikov V. *Materialwiss. Werkstofftech* [Material tech]. 2006, vol. 37, pp. 915–918.
 15. Lomakin V. V., Zaytseva T. V., Putivtseva N. P., Yatsenko V. M., Pusnaya O. P. *Nauchnye vedomosti. Ser.: Ekonomika. Informatika* [Scientific Bulletin. Ser.: Economy. Computer science]. 2016, iss. 40, no. 23 (244), pp. 124–133. [In Russian]
 16. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Karpanin O. V., Shepeleva Yu. V., Zinchenko T. O., Artamonov D. V. *Nanostrukturirovannye oksidnye plenki i pokrytiya: materialy IV Mezhdunar. molodezhnoy nauch. shkoly-seminara (9–12 oktyabrya 2017 g.)* [Nanostructured oxide films and coatings: materials of the IV international conference. youth scientific school-seminar (October 9-12, 2017)]. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2017, pp. 103–114. [In Russian]
 17. Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Kozlov G. V., Pecherskiy A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2019, no. 2, pp. 99–108. [In Russian]
 18. Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Artamonov D. V., Bibarsova A. M., Lysenko A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2019, no. 2, pp. 85–94. [In Russian]
 19. Syas'ko V. A., Golubev S. S., Smirnova N. I. *Sovremennye metody i pribory kontrolya kachestva i diagnostiki sostoyaniya ob"ektov: materialy 6-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Modern methods and devices for quality control and diagnostics of objects: materials of the 6th international conference. science.- tech. conf.]. Mogilev: MGOU VO «Belorussko-Rossiyskiy universitet», 2017, pp. 30–39. [In Russian]
 20. Korolev A. P. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tambov State Technical University]. 2012, vol. 18, no. 3, pp. 683–687. [In Russian]
 21. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Gromkov N. V., Zinchenko T. O., Artamonov D. V., Kochegarov I. I. *SCM-2019: materialy Mezhdunar. konf. po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* [SCM-2019: materials of the international conference. Conf. by soft computing and measurement]. Saint-Petersburg: Izd-vo SPBGETU «LETI» im. V. I. Ul'yanova (Lenina), 2019, vol. 1, pp. 300–303. [In Russian]

Голубков Павел Евгеньевич

аспирант, инженер,
кафедра информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: golpravpnz@yandex.ru

Golubkov Pavel Evgen'evich

postgraduate student, engineer,
sub-department of information-measuring equipment
and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Голубков, П. Е. Анализ применимости методов измерения толщины диэлектрических слоев при управляемом синтезе защитных покрытий методом микродугового оксидирования / П. Е. Голубков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 1 (31). – С. 81–92. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-11.