

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Чувыкин Б. В., Долгова И. А., Сидорова И. А., Нефедьев Д. И.
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА
ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАТОРОВ

7

**Нефедьев Д. И., Кривулин Н. П., Маланин В. П.,
Кикот В. В., Зверовщиков А. В.**
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВСКИПАНИЯ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ
ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ДАТЧИКОВ АКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

14

Ординарцева Н. П., Баранов А. А., Рыбаков И. М.
НОРМАТИВНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
КАЛИБРОВКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

22

Ординарцева Н. П.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
ПЕРЕДАЧИ В РАБОЧИХ УСЛОВИЯХ ЕДИНИЦЫ ВЕЛИЧИНЫ
КАЛИБРУЕМОМУ КАНАЛУ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

28

**Артамонов Д. В., Князьков А. В., Паришуков М. Ю.,
Сапунов Е. В., Светлов А. В.**
МОНИТОРИНГ ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ПРИ РАБОТЕ
В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМАХ

37

Абдулов Р. Н., Абдуллаев Н. А., Асадов Х. Г.

ТЕОРИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ
ТОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИЗМЕНЧИВЫХ
АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЯХ

44

Пауткин В. Е., Прилуцкая С. В.

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ СТОП-ТРАВЛЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

50

Асадов Х. Г., Исмаилов К. Х., Джахидзаде Ш. Н.

МЕТОД ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОИЗВОДНЫХ
СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
В АНАЛИЗЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

55

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Полосин В. Г.

ЭНТРОПИЙНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ОБНАРУЖИТЕЛИ
ЗУБЦОВ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА

61

Убиенных А. Г.

СЕРДЕЧНЫЕ АРИТМИИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ
ИХ РАЗМЕРНОСТИ

70

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Ишков А. С., Светлов А. В., Солодимова Г. А., Торгашин С. И.

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕЗИСТИВНЫХ
ПОТЕНЦИОМЕТРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАСТРОВОЙ
ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

77

Лысенко А. В., Калашников В. С., Гришко А. К.,

Горячев Н. В., Подсякин А. С.

УСТАНОВКА МОНИТОРИНГА ДИНАМИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ БОРТОВОЙ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

84

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

CONTENT

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNOLOGY

Chuvykin B. V., Dolgova I. A., Sidorova I. A., Nefediev D. I.

DEVELOPMENT OF THE METHOD
OF ENGINEERING CALCULATION
TIME CONSTANTS OF ANALOG INTEGRATORS

7

*Nefediev D. I., Krivulin N. P., Malanin V. P., Kikot V. V.,
Zverovshchikov A. V.*

FORECASTING THE EFFERVESCENCE
OF THE WORKING ENVIRONMENT TO PREVENT
EMERGENCY OPERATION OF POWER PLANTS
USING PIEZOELECTRIC ACOUSTIC PRESSURE SENSORS

14

Ordinartseva N. P., Baranov A. A., Rybakov I. M.
NORMATIVE-METHODOLOGICAL ENSURING
OF MEASURING SYSTEMS CALIBRATION

22

Ordinartseva N. P.

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION
OF THE POSSIBILITY TRANSMISSION
IN THE WORKING CONDITIONS OF UNIT VALUES
TO THE CALIBRATED CHANNEL MEASURING SYSTEM

28

*Artamonov D. V., Knyazkov A. V., Parshukov M. Yu.,
Sapunov E. V., Svetlov A. V.*

MONITORING OF FREQUENCY PARAMETERS
OF OPERATIONAL AMPLIFIERS WHEN OPERATING
IN NON-STATIONARY THERMAL MODES

37

Abdulov R. N., Abdullaev N. A., Asadov Kh. G.
THEORY OF DETECTION OF HIGH-SPEED POINT TYPE
OBJECTS UPON CHANGING ATMOSPHERIC CONDITIONS 44

Pautkin V. E., Prilutskaya S. V.
GEOMETRICAL STOP-ETCHING IN
MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS TECHNOLOGY 50

Asadov Kh. G., Ismailov K. Kh., Djahidzadeh Sh. N.
THE METHOD OF INTEGRAL TRANSFORMATION
FOR UTILIZATION OF DERIVATIVE SPECTRAL
CHARACTERISTICS IN ANALYSIS OF HYPERSPECTRAL DATA 55

MEDICAL AND BIOLOGICAL MEASUREMENT

Polosin V. G.
ENTROPY-PARAMETRIC DETECTORS
OF WAVES OF AN ELECTROCARDIO SIGNAL 61

Ubiennykh A. G.
CARDIAC ARRHYTHMIAS FROM VIEW POINT
OF ITS DIMENSION 70

RADIO MEASUREMENT

Ishkov A. S., Svetlov A. V., Solodimova G. A., Torgashin S. I.
MONITORING THE TECHNICAL STATE
OF RESISTIVE POTENTIOMETERS
USING SCANNING ELECTRON MICROSCOPY 77

*Lysenko A. V., Kalashnikov V. S., Grishko A. K.,
Goryachev N. V., Podsyakin A. S.*
INSTALLATION OF MONITORING DYNAMIC
PARAMETERS OF ELEMENTS OF DESIGNS
OF ONBOARD RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT 84



Пензенский государственный университет с глубоким прискорбием сообщает о смерти на 81-м году жизни советника при ректорате Евгения Александровича Ломтева и выражает глубочайшие соболезнования родным и близким.

Евгений Александрович Ломтев – заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор, действительный член Международной академии информатизации, действительный член Российской метрологической академии, академик Академии проблем качества Российской Федерации, ректор Пензенского политехнического института (1982–1999, ныне – Пензенский государственный университет), почетный профессор ПГУ, советник при ректорате.

Евгений Александрович Ломтев родился 14 мая 1937 г. в селе Иванькове Бельского района Великолукской области.

Евгений Александрович начал трудовую деятельность в 1951 г. Служил в Советской армии. В 1959 г. поступил в Пензенский политехнический институт (ныне – ПГУ). В 1960 г. перешел на заочный факультет, совмещая учебу с работой в отраслевой научно-исследовательской лаборатории автоматизации электрических измерений и контроля. Участник ВДНХ СССР, награжден серебряной и бронзовой медалями. В 1965 г., окончив ППИ, поступил в аспирантуру. Работал старшим преподавателем, доцентом, заведующим и профессором кафедры «Информационно-измерительная техника» ПГУ. Ученик и последователь

научной школы профессора В. М. Шляндина. Автор четырех монографий, более 250 научных работ и более 80 патентов и авторских свидетельств.

13 декабря 1982 г. приказом МВ и ССО РСФСР был назначен ректором Пензенского политехнического института. В 1987 г., оставаясь ректором вуза, избирается заведующим кафедрой ИИТ, во главе которой оставался до 2009 г., с 2009 по 2017 г. – профессор кафедры «Информационно-измерительная техника и метрология» ПГУ. Возглавлял вуз в течение 16 лет.

В годы работы Е. А. Ломтева на посту ректора в институте произошли большие качественные и структурные изменения. Появились новые специальности, факультеты, возрос и укрепился докторский и профессорский корпус вуза. В 1993 г. институт преобразован в технический университет, а с 1998 г. стал государственным университетом.

Неоднократно избирался депутатом местных Советов различного уровня, возглавлял областную организацию общества «Знание», Совет ректоров города.

Награжден орденами «Знак Почета», «Дружбы народов», юбилейной медалью «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина», медалью ордена «За заслуги перед Пензенской областью», медалью имени П. И. Паршина за заслуги перед университетом, знаками «Отличник высшей школы», «Почетный работник высшего образования России».

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 681.5.08

DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-1

Б. В. Чувькин, И. А. Долгова, И. А. Сидорова, Д. И. Нефедьев

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАТОРОВ

B. V. Chuvykin, I. A. Dolgova, I. A. Sidorova, D. I. Nefediev

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF ENGINEERING CALCULATION TIME CONSTANTS OF ANALOG INTEGRATORS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. При проектировании интегрирующих измерительных преобразователей, относящихся к классу нелинейных динамических систем, актуальны вопросы инженерного расчета постоянных времени аналоговых интеграторов при переходе на другую элементную базу с сохранением динамических характеристик прототипа при решении задачи импортозамещения. **Материалы и методы.** Используется известный принцип заимствования достижений из смежных научных областей, основанный на общности математических моделей. **Результаты.** Предложена инженерная методика расчета постоянных времени интегрирующих измерительных преобразователей, реализованных на аналоговых интеграторах. **Выводы.** Методика позволяет существенно расширить область поиска новых технических решений и получить максимальный технический эффект при практическом использовании интегрирующих измерительных преобразователей на аналоговых интеграторах в составе высокоточных интегрирующих аналого-цифровых преобразователей для решения сложных инженерных задач.

A b s t r a c t. Background. Problems of engineering calculation of time constants of analog integrators are actual in the design of integrating measuring converters belonging to the class of nonlinear dynamic systems in the transition on another element base, preserving dynamic characteristics of the prototype in solving the problem of import substitution. **Materials and methods.** The effective method of the analysis and transfer of achievements from adjacent areas based on a mathematical models is applied. **Results.** The proposed engineering method of calculating the time constants of the integrating measuring converters implemented with analog integrators. **Conclusions.** The method allows to significantly expand the scope of search for new technical solutions and to obtain maximum effect in the practical use of integrating measuring converters with analog integrators composed of a precision integrating analog-to-digital converters to solve complex engineering problems.

К л ю ч е в ы е с л о в а: интегрирующий измерительный преобразователь, высокоточный интегрирующий аналого-цифровой преобразователь, нелинейность, сигма-дельта

модулятор, сигма-дельта аналого-цифровой преобразователь, системы детерминированного хаоса.

Key words: integrating measuring converters, precision integrating analog-to-digital converter, nonlinearity, sigma-delta modulator, sigma-delta analog-to-digital converter, systems of the determined chaos.

Введение

В настоящее время существует потребность пополнения отечественной электронной компонентной базы высокоточными интегрирующими аналого-цифровыми преобразователями (ИАЦП), обеспечивающими эффективную разрядность 14 и более бит. Многие выпускаемые серийно и специализированные высокоточные сигма-дельта модуляторы (СДМ) и сигма-дельта аналого-цифровые преобразователи (СДАЦП) на дискретных интеграторах имеют узкий диапазон рабочих частот (не более десятков кГц) и значительную потребляемую мощность (более 100 мВт) [1]. Кроме того, принципиальные особенности реализации наилучших по совокупности характеристик СДМ и СДАЦП данного класса, а также методы и средства их проектирования обычно не публикуются в открытой печати и отсутствуют в свободном доступе, что ограничивает возможные варианты их применения.

Анализ публикаций зарубежных и отечественных авторов показал, что недостаточное внимание уделяется анализу и реализации возможностей снижения энергопотребления ИАЦП за счет перехода к другой структуре и к другой технологии при сохранении динамических характеристик. Такие решения обладают значительными возможностями с точки зрения построения маломощных высокоточных ИАЦП.

Применение метода переноса достижений из смежных научных областей

На основе анализа характеристик выпускаемых СДМ и СДАЦП сделан вывод, что в СДАЦП требования на характеристики блоков аналоговой части достаточно жесткие [2]. Наибольшей потребляемой мощностью обладают блоки интеграторов интегрирующего измерительного преобразователя (ИИП), входящего в состав ИАЦП, независимо от выбранной структуры [3]. Это обусловлено необходимостью обеспечения большого коэффициента усиления во всей рабочей полосе частот и выходного тока, достаточного для заряда конденсаторов в цепях обратной связи [4]. Предлагается использовать современные достижения аналоговой электроники и заменить дискретные интеграторы на аналоговые. Такой переход позволит повысить помехоустойчивость, снизить энергопотребление или сохранить известные динамические характеристики прототипа на другой элементной базе для решения задачи импортозамещения.

На примере расчета ИИП второго порядка на аналоговых интеграторах в форме методики показано, как использовать известный метод переноса достижений из смежных научных областей для расчета численных значений постоянных времени интеграторов, если в качестве прототипа используются известные структурно-алгоритмические решения СДМ на дискретных интеграторах. При этом обеспечивается полное совпадение динамических характеристик аналогового варианта ИИП с динамическими характеристиками дискретного варианта ИИП с точностью, ограниченной инструментальными погрешностями [5].

В основу расчета положен метод, заимствованный из теории цифровой фильтрации, который описан в литературе [6] как метод инвариантного преобразования импульсной характеристики, где в качестве импульсной характеристики рассчитываемого цифрового фильтра используется дискретизированная импульсная характеристика соответствующего аналогового фильтра. В результате частотная характеристика цифрового фильтра образуется путем наложения частотной характеристики дискретизированного аналогового фильтра. Совпадение импульсных характеристик цифрового и аналогового фильтра в дискретном пространстве времени обеспечивает перенос (сохранение) всех частотно-временных характеристик. Применительно к нашей задаче использование метода инвариантного преобразования заключается в решении обратной задачи, т.е. в качестве аналога выбирается дискретный (цифровой вариант) интегратор, а конечным результатом является аналоговый вариант ИИП (на аналоговых интеграторах).

Методика инженерного расчета постоянных времени аналоговых интеграторов

Найдем значения постоянных времени аналоговых интеграторов по предложенной методике инженерного расчета на примере варианта ИИП второго порядка, для которых в качестве аналога по динамическим характеристикам используется вариант ИИП на дискретных интеграторах.

Интегрирующее звено второго порядка для варианта аналоговых интеграторов приведено на рис. 1,а. Для упрощения на рис. 1,б на дискретных интеграторах не изображены коммутируемые ключи.

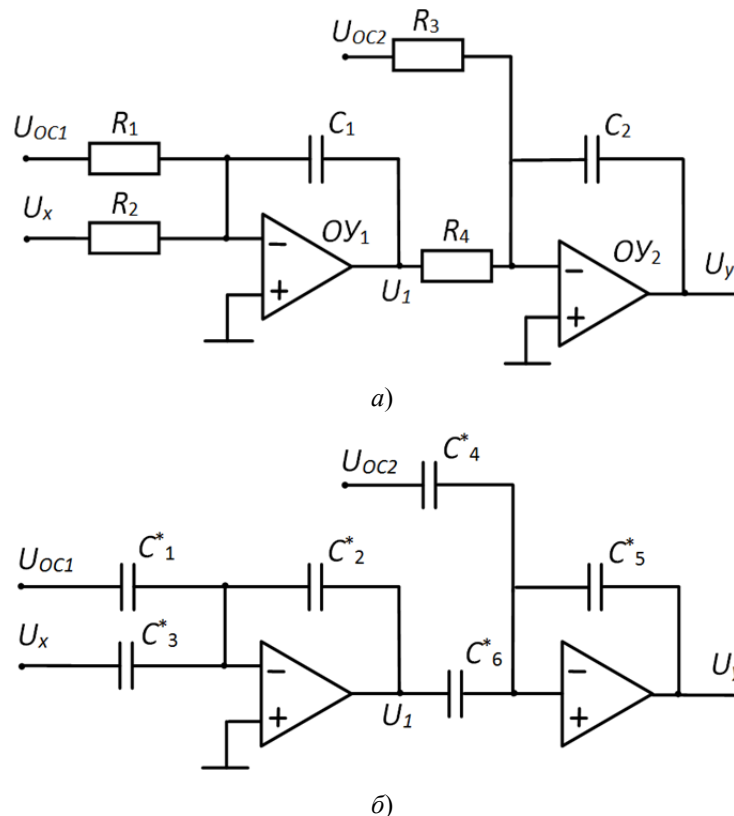


Рис. 1. Схемы интегрирующего звена второго порядка:
а – на аналоговых; б – на дискретных интеграторах

Результат преобразования за один цикл работы интегрирующего звена второго порядка на аналоговых интеграторах будет выражаться как

$$\begin{cases} U_y = U_x \frac{h^2}{R_2 R_4 C_1 C_2} + U_{oc1} \frac{h^2}{R_1 R_4 C_1 C_2} - U_1 \frac{h}{R_4 C_2} - U_{oc2} \frac{h}{R_3 C_2}, \\ U_1 = - \left(U_x \frac{h}{R_2 C_1} + U_{oc1} \frac{h}{R_1 C_1} \right). \end{cases} \quad (1)$$

Результат преобразования за один цикл работы интегрирующего звена второго порядка на дискретных интеграторах будет выражаться как

$$\begin{cases} U_y = - \left(U_1 \frac{C_6^*}{C_5^*} + U_{oc2} \frac{C_4^*}{C_5^*} \right), \\ U_1 = - \left(U_x \frac{C_3^*}{C_2^*} + U_{oc1} \frac{C_1^*}{C_2^*} \right). \end{cases} \quad (2)$$

Для дальнейшего расчета коэффициенты системы уравнений (1) и (2) должны быть равны, поэтому из первого уравнения системы уравнений (1) необходимо исключить U_x и U_{oc1} . Добавим в рис. 1,а дополнительные связи с резисторами R_5 и R_6 , которые скомпенсируют влияние U_x и U_{oc1} . Тогда результат преобразования будет выражаться как

$$\begin{cases} U_y = U_x \frac{h^2}{R_2 R_4 C_1 C_2} + U_{oc1} \frac{h^2}{R_1 R_4 C_1 C_2} - U_1 \frac{h}{R_4 C_2} - U_{oc2} \frac{h}{R_3 C_2} - U_{oc1} \frac{h}{R_5 C_2} - U_x \frac{h}{R_6 C_2}, \\ U_1 = - \left(U_x \frac{h}{R_2 C_1} + U_{oc1} \frac{h}{R_1 C_1} \right). \end{cases} \quad (3)$$

В ходе преобразования (1) в (3) получим условия

$$\begin{cases} \frac{h^2}{R_2 R_4 C_1 C_2} = \frac{h}{R_6 C_2}, \\ \frac{h^2}{R_1 R_4 C_1 C_2} = \frac{h}{R_5 C_2}. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{R_2 R_4 C_1}{h R_6} = 1, \\ \frac{R_1 R_4 C_1}{h R_5} = 1. \end{cases} \quad (4)$$

Путем пересчета значений коэффициентов из условия равенства систем уравнений (1) и (3) и условий (4) получим

$$\begin{cases} \frac{h}{R_2 C_1} = \frac{C_3^*}{C_2^*}, \\ \frac{h}{R_1 C_1} = \frac{C_1^*}{C_2^*}, \\ \frac{h}{R_4 C_2} = \frac{C_6^*}{C_5^*}, \\ \frac{h}{R_3 C_2} = \frac{C_4^*}{C_5^*}. \end{cases} = \begin{cases} R_2 C_1 = \frac{h C_2^*}{C_3^*}, \\ R_1 C_1 = \frac{h C_2^*}{C_1^*}, \\ R_4 C_2 = \frac{h C_5^*}{C_6^*}, \\ R_3 C_2 = \frac{h C_5^*}{C_4^*}. \end{cases} \quad (5)$$

Перейдем к новым переменным в (6), где τ_1 и τ_2 – постоянные времени первого интегратора, где τ_3 и τ_4 – постоянные времени второго интегратора:

$$\begin{cases} \tau_1 = \frac{h C_2^*}{C_3^*}, \\ \tau_2 = \frac{h C_2^*}{C_1^*}, \\ \tau_3 = \frac{h C_5^*}{C_6^*}, \\ \tau_4 = \frac{h C_5^*}{C_4^*}. \end{cases} \quad (6)$$

Проведено имитационное моделирование ИИП второго порядка с однобитным квантованием (реализует математическая функция Sign) в среде Matlab SIMULINK [7]. Ниже на рис. 2 приведены структуры ИИП второго порядка на аналоговых (обозначены Int на схеме) и на дискретных (обозначены Sum на схеме) интеграторах с пересчитанными постоянными времени интеграторов (на схеме tau) согласно формуле (6).

Из рис. 3 видно полное совпадение энергетических спектров выходных сигналов ИИП с дискретными (рис. 3,а) и с аналоговыми (рис. 3,б) интеграторами в структуре, что подтверждает корректность полученных формул и означает подобие динамических характеристик для идеальных элементов системы. Таким образом, в работе показано, что использование

предложенной методики позволяет во многих случаях преодолеть сложность математических расчетов, используя в качестве аналога известные варианты замкнутых нелинейных структур.

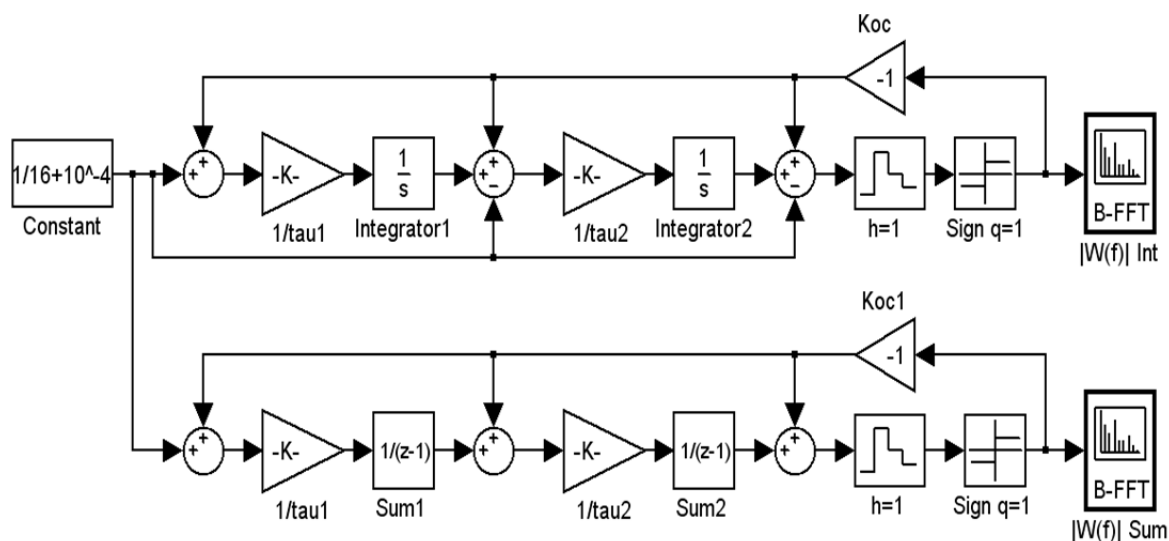


Рис. 2. Структуры ИИП второго порядка на аналоговых и дискретных интеграторах

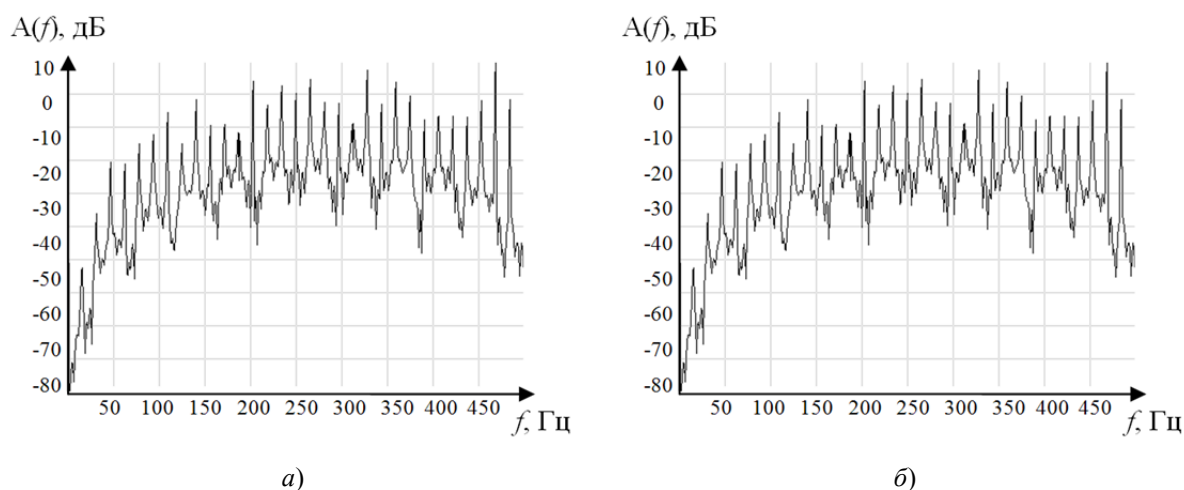


Рис. 3. Энергетические спектры ИИП второго порядка на:
а – аналоговых; б – дискретных интеграторах

Обобщая рассмотренный принцип переноса можно его распространить и на комбинированные структуры ИИП, состоящие из аналоговых и дискретных интеграторов. К примеру, можно использовать готовые микросхемы СДМ на дискретных интеграторах, на входе которых дополнительно подключены аналоговые интеграторы, охваченные общей обратной связью. Это особенно актуально для решения задачи повышения помехоустойчивости.

Заключение

Разработанная методика инженерного расчета постоянных времени при проектировании ИИП на аналоговых интеграторах позволила снизить энергопотребление за счет снижения требований к операционным усилителям по частотному диапазону и максимальной скорости нарастания выходного сигнала, что особенно важно для автономных беспроводных измерительных приборов и систем. Это свойство можно также использовать для увеличения быстродействия при сохранении тока потребления в рамках обменной функции «быстродействие – точность – энергопотребление» и повысить помехоустойчивость за счет использования аналоговых интеграторов в качестве фильтра нижних частот [8].

Библиографический список

1. Чувькин, Б. В. $\Sigma\Delta$ -аналого-цифровые преобразователи: основы теории и проектирование : монография / Б. В. Чувькин, В. Н. Ашанин, Э. К. Шахов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2009 – 188 с.
2. Ашанин, В. Н. Анализ состояния и тенденций производства интегральных преобразователей информации $\Sigma\Delta$ -архитектуры / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, А. А. Коротков, И. А. Сидорова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 1. – С. 26–35.
3. Васильев, В. А. Системный подход к совершенствованию измерительных преобразователей / В. А. Васильев, Н. В. Громков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 4. – С. 33–38.
4. Хоровиц, П. Искусство схемотехники : пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. – М. : Мир, 1983. – Т. 2. – 590 с.
5. Ашанин, В. Н. Анализ инструментальной составляющей погрешности однобитных $\Sigma\Delta$ -модуляторов / В. Н. Ашанин, А. А. Коротков, Б. В. Чувькин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 2. – С. 52–61.
6. Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М. : Мир, 1978. – 848 с.
7. Чувькин, Б. В. Вопросы проектирования высокоточных сигма-дельта АЦП в составе информационно-измерительных систем / Б. В. Чувькин, И. А. Долгова, И. А. Сидорова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 3. – С. 39–45.
8. Schreier, R. Understanding delta-sigma data converters / R. Schreier, G. C. Temes. – New Jersey : IEEE Press, 2005. – 446 p.

Чувькин Борис Викторович

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

Chuvykin Boris Viktorovich

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

Долгова Ирина Анатольевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: Dolgova_IA@mail.ru

Dolgova Irina Anatolevna

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

Сидорова Ирина Александровна

программист,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: irina-penza@mail.ru

Sidorova Irina Alexandrovna

programmer,
sub-department of information and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Нефедьев Дмитрий Иванович

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

Nefediev Dmitriy Ivanovich

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

УДК 681.5.08

Чувькин, Б. В.

Разработка методики инженерного расчета постоянных времени аналоговых интеграторов / Б. В. Чувькин, И. А. Долгова, И. А. Сидорова, Д. И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – №4 (22). – С. 7–13. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-1.

**Д. И. Нефедьев, Н. П. Кривулин, В. П. Маланин,
В. В. Кикот, А. В. Зверовщиков**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВСКИПАНИЯ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ
ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ДАТЧИКОВ АКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ**

D. I. Nefediev, N. P. Krivulin, V. P. Malanin, V. V. Kikot, A. V. Zverovshchikov

**FORECASTING THE EFFERVESCENCE OF THE WORKING
ENVIRONMENT TO PREVENT EMERGENCY OPERATION
OF POWER PLANTS USING PIEZOELECTRIC
ACOUSTIC PRESSURE SENSORS**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* При эксплуатации энергетических установок актуальна проблема прогнозирования, своевременного обнаружения и минимизации последствий воздействия дестабилизирующих факторов. Например, возрастание градиента температуры рабочей среды (теплоносителя, топлива, окислителя и пр.) с достижением температуры ее кипения сопровождается многократным увеличением давления и может стать причиной неконтролируемого (аварийного) режима эксплуатации энергетической установки. Объектом исследования являются процессы изменения акустического шума в диапазоне частот и температуры рабочей среды на протяжении времени от начальных стадий кипения до вскипания рабочей среды. Предмет исследования – способы определения вскипания рабочей среды. Целью работы является исследование возможностей прогнозирования вскипания рабочей среды для предотвращения аварийных режимов эксплуатации энергетических установок с использованием пьезоэлектрических датчиков акустического давления. *Материалы и методы.* При математическом моделировании процесса эксплуатации пьезоэлектрических датчиков при кипении рабочей среды использовались методы операционного исчисления. Для расчета значения прогнозируемой длительности времени до вскипания с использованием предлагаемой математической модели использовалось программное обеспечение MathCAD. В экспериментальных исследованиях использовались положения теории планирования эксперимента и принципы математической обработки результатов. *Результаты.* Предложена методика прогнозирования вскипания рабочей среды для предотвращения аварийных режимов эксплуатации энергетических установок с использованием пьезоэлектрических датчиков акустического давления. Методика основана на анализе временных зависимостей значений выходных сигналов пьезоэлектрических датчиков информативных относительно акустического давления и температур пьезоэлементов датчиков. Изложены результаты экспериментов по определению временных зависимостей выходных сигналов датчиков. *Выводы.* Использование предлагаемой методики способа позволит увеличить задел научно-технических решений, направленных на предотвращение аварийных ситуаций при эксплуатации энергетических установок.

Abstract. Background. In the operation of power plants is an actual problem of forecasting, early detection and minimize the consequences of exposure to destabilizing factors. For example, the increase of the temperature gradient of the working medium (coolant, fuel, oxidant, etc.) with the temperature reaching its boiling point is accompanied by a multiple increase in pressure and can cause uncontrolled (emergency) mode of operation of the power plant. The object of study is the process of changing of the acoustic noise in the frequency range and temperature of the working environment over time from the initial stages of the boil to boil the working environment. Subject of research – methods of determining the boiling working medium. The aim of this work is to study possibilities of prediction of the boiling of the working environment to prevent emergency modes of operation of power plants using piezoelectric sensors acoustic pressure. **Materials and methods.** In mathematical modeling of the process of operation of piezoelectric sensors during boiling of the working environment, we used the methods of operational calculus. To calculate the values of the predictable duration of time to boil using the proposed mathematical model used MathCAD software. In the experimental studies used the tenets of the theory of experiment planning and the principles of mathematical processing of the results. **Results.** The proposed method for predicting boiling of the working environment to prevent emergency modes of operation of power plants using piezoelectric sensors acoustic pressure. The technique is based on the analysis of time dependences of values of output signals of the piezoelectric sensors informative regarding the acoustic pressure and the temperature of piezoelectric sensors. The results of experiments to determine time dependencies of the output signals of the sensors. **Conclusions.** Using the proposed method the method will allow to increase a backlog of scientific and technical solutions aimed at prevention of emergency situations in the operation of power plants.

Ключевые слова: прогнозирование, аварийный режим, эксплуатация энергетической установки, датчики акустического давления.

Key words: forecasting, emergency operation, operation of power plant, sensors of acoustic pressure.

Введение

При эксплуатации энергетических установок актуальна проблема прогнозирования, своевременного обнаружения и минимизации последствий воздействия дестабилизирующих факторов [1–4]. Например, возрастание градиента температуры рабочей среды (теплоносителя, топлива, окислителя и пр.) с достижением температуры ее кипения сопровождается многократным увеличением давления (рис. 1) и может стать причиной неконтролируемого (аварийного) режима эксплуатации энергетической установки [5]. Исследование возможностей прогнозирования вскипания рабочей среды для предотвращения аварийных режимов эксплуатации является актуальной задачей, решение которой способствует повышению надежности энергетических установок.

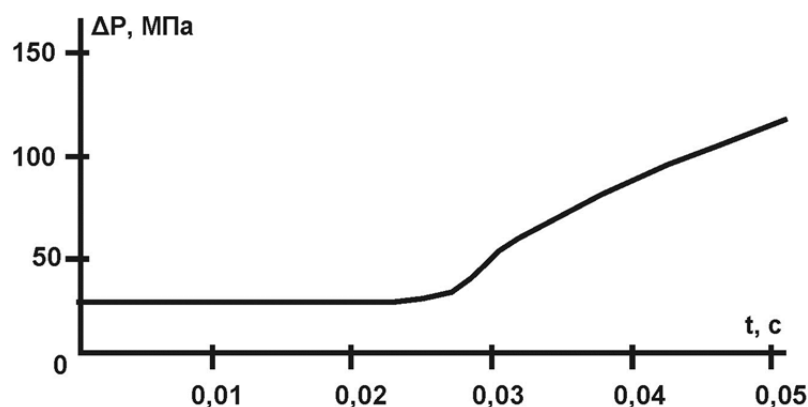


Рис. 1. Повышение давления воды при вскипании на поверхности трубчатого элемента [5]

Известен способ определения вскипания по изменению амплитуды акустических волн, которые генерируются звуковым излучателем, при их прохождении через образующиеся пузырьки пара [6]. Там же приводится способ без использования звукового излучателя, основанный на определении вскипания по возрастанию амплитуды акустического шума, а в работе [7] описывается способ, основанный на анализе изменений спектра акустического шума рабочей среды. Недостатком данных способов является низкая точность определения вскипания в связи с ошибками определения вскипания из-за воздействия посторонних источников акустического шума, например, от подвижных элементов конструкции энергетической установки при изменении режимов ее эксплуатации.

Известен способ обнаружения кипения нагреваемой жидкости, заключающийся в регистрации изменения амплитуды ультразвукового импульсного сигнала при прохождении его сквозь тело, на поверхности которого происходит кипение жидкости [8].

Недостаток этого способа – низкая точность обнаружения кипения при нагревании жидкости погруженным в нее телом, имеющим горизонтальные поверхности, в связи с одинаковыми изменениями амплитуды сигнала, излученного источником ультразвука, при кипении и при отсутствии кипения жидкости из-за скопления жидкости в паровой фазе под горизонтальными поверхностями погруженного в жидкость тела.

Целью работы является исследование возможностей прогнозирования вскипания рабочей среды для предотвращения аварийных режимов эксплуатации энергетических установок с использованием пьезоэлектрических датчиков акустического давления.

Для достижения поставленной цели требуется:

- 1) получить временные зависимости выходных сигналов пьезоэлектрических датчиков с параметрами, информативными не только относительно акустического давления, но и относительно температур пьезоэлементов датчиков, и сформулировать критерии, позволяющие спрогнозировать длительность времени от начальных стадий кипения до вскипания рабочей среды;
- 2) на основе сформулированных критериев разработать математическую модель процесса эксплуатации пьезоэлектрических датчиков, применение которой позволит спрогнозировать длительность времени от начальной стадии кипения до вскипания рабочей среды.

Основная часть

Временные зависимости выходных сигналов пьезоэлектрических датчиков акустического давления с параметрами, информативными относительно акустического давления и температур пьезоэлементов датчиков, определены с использованием лабораторной установки, схема которой приведена на рис. 2.

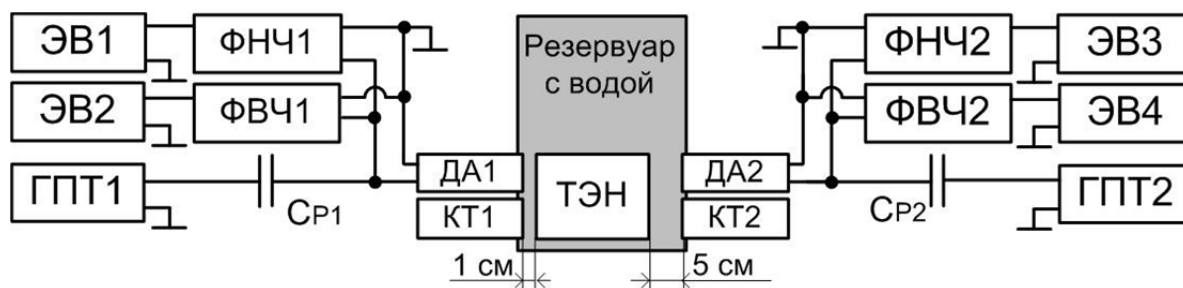


Рис. 2. Схема лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из резервуара с водой, термоэлектрического нагревательного элемента ТЭН, двух пьезоэлектрических датчиков акустического давления ДА1 и ДА2 типа ДХС 525 [9], контрольных термометров КТ1 и КТ2 типа ТЛ-2 ГОСТ 215-73, причем ДА1 и КТ1 установлены на расстоянии 1 см, а ДА2 и КТ2 – на расстоянии 5 см от нагревательной поверхности ТЭНа. Градиент повышения температуры воды в используемой установке составляет 120 °С в час.

Измерительная цепь состоит из генераторов переменного синусоидального тока частотой 1 МГц и амплитудой 12 В ГПТ1 и ГПТ2 типа HandyScope HS4, разделительных конденса-

торов C_{P1} и C_{P2} , фильтров низких частот ФНЧ1 и ФНЧ2 со значениями верхней границы полосы пропускания 10 кГц, фильтров высоких частот ФВЧ1 и ФВЧ2 со значениями нижней границы полосы пропускания 1 МГц, электронных цифровых вольтметров ЭВ1–ЭВ4 типа В7–78.

Пьезоэлементы датчиков ДА и ДА2 изготовлены из модифицированного пьезоматериала ЦТС-83Г, что позволяет использовать их для измерения не только акустического давления, но и температур пьезоэлементов датчиков [10]. Информативными относительно акустического давления являются среднеквадратичные значения (СКЗ) амплитуды выходных напряжений ДА1, ДА2 на частоте от 20 Гц до 10 кГц. Информативными относительно температуры являются СКЗ амплитуды выходных напряжений ДА1, ДА2 на частоте 1 МГц.

На рис. 3 приведены результаты определения временных зависимостей выходных сигналов пьезоэлектрических датчиков.

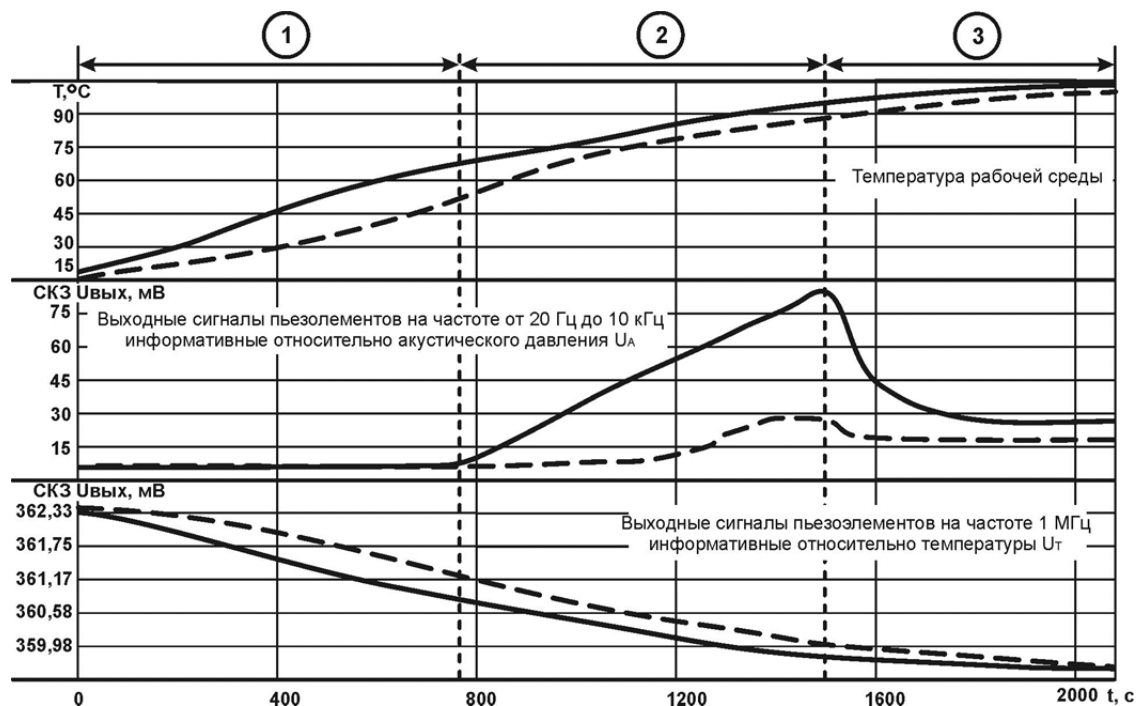


Рис. 3. Выявление критериев для определения времени от ранней стадии кипения до вскипания рабочей среды

В течение первого интервала с 0 до 330 с, до начальной стадии кипения, на поверхности ТЭНа образуются пузырьки пара диаметром до 0,5 мм, изменения акустического давления незначительны. Во втором интервале с 331 по 1560 с, на начальной стадии кипения, на поверхности ТЭНа продолжается образование и отделение пузырьков пара, диаметр которых увеличивается с 0,5 до 7 мм с ростом температуры. Этот процесс сопровождается ростом акустического давления. В момент времени равный 1560 с акустическое давление достигает своего максимального значения. В начале третьего интервала, который длится с 1561 по 2100 с, вода вскипает и кипит с образованием пузырьков пара диаметром до 1 см, что сопровождается снижением акустического давления.

Анализ результатов эксперимента показал, что спрогнозировать длительность времени до вскипания рабочей среды (длительность второго интервала показана на рис. 3) можно на основе использования математической модели процесса эксплуатации пьезоэлектрического датчика при вскипании рабочей среды на основе двух следующих критериев:

1) критерий начальной стадии кипения, которым является соответствие измеренных при эксплуатации СКЗ амплитуды выходных сигналов датчиков ДА1 и ДА2, информативных относительно измеряемого акустического давления и температуры рабочей среды, значениям, которые соответствуют начальной стадии кипения;

2) критерий вскипания рабочей среды, которым является соответствие измеренных при эксплуатации СКЗ амплитуды выходных сигналов датчиков ДА1 и ДА2 информативных отно-

сительно измеряемого акустического давления и температуры рабочей среды, значениям, которые соответствуют моменту вскипания рабочей среды.

Параметры математической модели процесса эксплуатации предлагается определять по результатам измерения СКЗ амплитуды выходных сигналов датчиков ДА1 и ДА2 в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации, при известных значениях объема сосуда и рабочей среды, плотности, давления, температуры вскипания рабочей среды.

Физические явления, которые наблюдаются в чувствительном элементе пьезоэлектрического датчика при вскипании рабочей среды, не дают возможности составить полную физическую модель процесса его эксплуатации из-за необходимости учета влияния многих воздействующих факторов и дать ее математическое описание [4, 6]. Поэтому в качестве математической модели процесса эксплуатации пьезоэлектрического датчика рассматривается модель вида «вход-выход» для дискретных динамических систем с распределенными параметрами, которая описывается уравнением вида [11, 12]

$$U_{AK}(k, m) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^{m-1} g(k, i, m, j) x(i, j), \quad (1)$$

где $m = 1$ – для датчика ДА1, а $m = 2$ – для датчика ДА2; $k = 0, 1, 2, \dots$ – временные отсчеты измерения СКЗ амплитуды выходного напряжения для ДА1 и ДА2 на частоте от 20 Гц до 10 кГц; $x(k, 1) = U_1(k)$, $x(k, 2) = U_2(k)$, $k = 0, 1, 2, \dots$ – СКЗ амплитуды выходного напряжения ДА1 и ДА2 на частоте от 20 Гц до 10 кГц (информативные относительно измеряемого акустического давления); $g(k, i, m, j)$ – импульсная переходная функция процесса эксплуатации пьезоэлектрического датчика; $U_{AK}(k, m)$ – выходной сигнал, в качестве которого выступает индикаторная функция, определяемая выражением

$$U_{AK}(k, m) = \begin{cases} 0, & k = 0, 1, 2, \dots, k_v - 1, \\ 1, & k = k_v, k_v + 1, \dots, k_K, \quad m = 1, 2, \\ 0, & k = k_K + 1, k_K + 2, \dots, \end{cases} \quad (2)$$

где k_v – временной отсчет, соответствующий начальной стадии кипения; k_K – временной отсчет, соответствующий вскипанию рабочей среды.

Время от начальных стадий кипения с требуемыми значениями акустического давления и температуры рабочей среды до момента вскипания определяется выражением $\Delta T_p = k_K - k_v + 1$.

Импульсная переходная функция находится при условии

$$g(k, i, m, j) = -\frac{1}{4\pi^2} \oint_{C_2} \oint_{C_1} G(z_1, z_2) [q_1(z_1)]^{-i} [q_2(z_2)]^{-j} z_1^{-k} z_2^{-m} dz_1 dz_2, \quad (3)$$

где C_1, C_2 – контуры интегрирования, содержащие все особые точки функции $G(z_1, z_2) [q_1(z_1)]^{-i} [q_2(z_2)]^{-j}$.

При этом предполагается, что Z-преобразование импульсной переходной функции $g(k, i, m, j)$ по переменным k, m удовлетворяет условию

$$Z[g(k, i, m, j)] = G(z_1, z_2) [q_1(z_1)]^{-i} [q_2(z_2)]^{-j},$$

где функции $G(z_1, z_2), q_1(z_1), q_2(z_2)$ есть некоторые аналитические функции, значения которых определяются из решения системы уравнений

$$\begin{cases} G(z_1, z_2) X_1(q_1(z_1), q_2(z_2)) = U_{AK}(z_1, z_2), \\ G(z_1, z_2) X_2(q_1(z_1), q_2(z_2)) = U_{AK}(z_1, z_2), \\ G(z_1, z_2) X_3(q_1(z_1), q_2(z_2)) = U_{AK}(z_1, z_2), \end{cases} \quad (4)$$

где $X_1(z_1, z_2)$, $X_2(z_1, z_2)$, $X_3(z_1, z_2)$ – Z-преобразования входных сигналов $x_1(k, m)$, $x_2(k, m)$, $x_3(k, m)$, $m = 1, 2$; $k = 0, 1, 2, \dots$, которое определяется формулой

$$F(z_1, z_2) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} f(k, m) z_1^{-k} z_2^{-m}.$$

Для разработки математической модели, определяемой выражением (1), требуется по временным зависимостям СКЗ амплитуд выходных сигналов датчиков ДА1 и ДА2 на частотах от 20 Гц до 10 кГц построить импульсную переходную функцию (3).

Для измеряемого акустического давления принято, что $U_1(k, m)$, $m = 1, 2$; $k = 2l$, $l = 0, 1, 2, \dots$ – четные отсчеты измеряемых СКЗ амплитуды выходных сигналов датчиков ДА1 и ДА2; $U_2(k, m)$, $m = 1, 2$; $k = 2l + 1$, $l = 0, 1, 2, \dots$ – нечетные отсчеты измеряемых СКЗ амплитуды выходных сигналов датчиков ДА1 и ДА2; $x_3(k, m) = U_1(k) - U_2(k)$, $k = 0, 1, 2, \dots$ – разность СКЗ амплитуды выходных сигналов датчиков ДА1 и ДА2.

Для определения значения длительности времени до вскипания рабочей среды, которое характеризуется не только началом переходного процесса в датчиках ДА1 и ДА2, но и его продолжительностью, определяются математические модели ДА1 и ДА2 в виде

$$U_{AK}(k, m) = \sum_{l=0}^k g(m, k, l) \cdot T(l), \quad (5)$$

где $m = 1, 2$ – временные отсчеты измерения акустического давления; $k = 0, 1, 2, \dots$ – временные отсчеты измерения СКЗ амплитуды выходного напряжения ДА1 и ДА2 на частоте от 20 Гц до 10 кГц, информативные относительно акустического давления; $l = 0, 1, 2, \dots$ – временные отсчеты измерения СКЗ амплитуды выходного напряжения ДА1 и ДА2 на частоте 1 МГц, информативные относительно температуры; $g(m, k, l)$ – импульсные переходные функции процесса эксплуатации датчиков ДА1 и ДА2; $T(l)$ – значения температуры рабочей среды, полученные с использованием СКЗ выходных сигналов датчиков ДА1 и ДА2 на частоте 1 МГц, информативных относительно температуры рабочей среды.

Метод определения импульсных переходных функций $g(m, k, l)$, $m = 1, 2$; $k = 0, 1, 2, \dots$ аналогичен методу определения импульсной переходной функции $g(k, i, m, j)$ модели (1).

Переходные процессы в датчиках ДА1 и ДА2 определяются переходными функциями (6) и (7) соответственно:

$$h_1(k, m) = \sum_{l=0}^k g(1, k, l), k = 0, 1, 2, \dots, \quad (6)$$

$$h_2(k, m) = \sum_{l=0}^k g(2, k, l), k = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

Заключение

Предлагаемые математические модели процесса эксплуатации пьезоэлектрических датчиков акустического давления позволяют при известных значениях объема сосуда и рабочей среды, плотности, давления, температуры вскипания рабочей среды:

1) прогнозировать длительность времени до вскипания рабочей среды с использованием выражения (1);

2) провести имитационное моделирование процесса эксплуатации пьезоэлектрического датчика при вскипании рабочей среды с использованием выражения (5);

3) определить с использованием выражения (5) качество переходных процессов в датчиках ДА1 и ДА2, описываемых уравнениями (6), (7).

Использование предлагаемого способа позволит увеличить задел научно-технических решений, направленных на предотвращение аварийных ситуаций при эксплуатации энергетических установок.

Библиографический список

1. Баринов, И. Н. Разработка и изготовление микроэлектронных датчиков давления для особо жестких условий эксплуатации / И. Н. Баринов, В. С. Волков, Б. В. Цыпин, С. П. Евдокимов // Датчики и системы. – 2014. – № 2. – С. 49–61.
2. Волков, В. С. Компенсация температурной погрешности чувствительности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 1 (3). – С. 30–36.
3. Мокров, Е. А. Разработка высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / Е. А. Мокров, И. Н. Баринов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 1. – С. 23–27.
4. Коротких, А. Г. Основы гидродинамики и теплообмена в ядерных реакторах : учеб. пособие / А. Г. Коротких, И. В. Шаманин. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та, 2007. – 117 с.
5. Левин, А. А. Применение преобразования Гильберта-Хуанга в задачах экспериментального изучения теплофизических процессов / А. А. Левин, В. А. Спиряев // Обобщенные постановки и решения задач управления : сб. тр. Междунар. симп. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2014. – С. 28–29.
6. Пат. 2065604 РФ, С1, МПК G01N29/02, A47J27/212. Способ определения момента закипания жидкости и устройство для его осуществления / Миллер А. А. ; заявл. 25.04.1994 ; опубл. 20.08.1996.
7. Кривцов, В. А. Высокотемпературные акустические датчики с органосиликатной изоляцией / В. А. Кривцов, Р. Ф. Масагутов. – Л. : Наука, 1982. – 167 с.
8. А. с. SU 1503502 A1, МПК G01N 29/02. Способ обнаружения кипения нагреваемой жидкости / Смирнов О. В., Ремизов Ю. А. ; № 4288911/28 ; заявл. 04.05.1987 ; опубл. 27.03.1997.
9. Преобразователи. Системы. Каталог ОАО «НИИФИ». – Пенза : Пензенская правда, 2011. – С. 70–98.
10. Кикот, В. В. Разработка электронного преобразователя для пьезодатчика динамического давления / В. В. Кикот, В. П. Маланин, А. С. Баранов // Приборы. – 2015. – № 10. – С. 10–16.
11. Бойков, И. В. Аналитические и численные методы идентификации динамических систем : монография / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – 398 с.
12. Бойков, И. В. Математическая модель пьезодатчиков динамического давления / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин, В. В. Кикот // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 295–297.

Нефедьев Дмитрий Иванович

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

Nefediev Dmitriy Ivanovich

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

Кривулин Николай Петрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра высшей и прикладной математики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: krivulin@bk.ru

Krivulin Nikolay Petrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of high and applied mathematics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Маланин Владимир Павлович

кандидат технических наук,
инженер-электроник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: ait@pnzgu.ru

Malanin Vladimir Pavlovich

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

Кикот Виктор Викторович

кандидат технических наук,
начальник технологического бюро,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: inbox@post.su

Kikot Viktor Viktorovich

candidate of technical sciences,
chief of technological bureau,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Зверовщиков Анатолий Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра технологии машиностроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tmspgu@mail.ru

Zverovshchikov Anatoliy Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of technology
of mechanical engineering,
Пензенский государственный университет
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.586`326`773: 621.311.004

Прогнозирование вскипания рабочей среды для предотвращения аварийных режимов эксплуатации энергетических установок с использованием пьезоэлектрических датчиков акустического давления / Д. И. Нефедьев, Н. П. Кривулин, В. П. Маланин, В. В. Кикот, А. В. Зверовщиков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – №4 (22). – С. 14–21. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-2.

Н. П. Ординарцева, А. А. Баранов, И. М. Рыбаков

НОРМАТИВНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЛИБРОВКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

N. P. Ordinartseva, A. A. Baranov, I. M. Rybakov

NORMATIVE-METHODOLOGICAL ENSURING OF MEASURING SYSTEMS CALIBRATION

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования являются нормативно-методологические документы, регламентирующие калибровку измерительных каналов измерительных систем. **Материалы и методы.** В соответствии с действующими нормативными документами, отечественными стандартами представлен анализ терминологического определения измерительной системы; с целью гармонизации проведено сравнение термина с определением в международных стандартах. Рассмотрено кардинальное изменение дефиниции «калибровка» с принятием ФЗ №102. **Результаты.** Исследован вопрос обеспечения калибровки измерительных систем в отечественной нормативной базе и ее гармонизации с принятыми международными методологическими представлениями. В статье представлены основные терминологические, методологические, алгоритмические положения процедуры калибровки и оценивания неопределенности измерений измерительных систем. Приведен перечень действующих нормативных документов, регламентирующих калибровку измерительных систем. Статья может быть интересна специалистам в области метрологического обеспечения средств измерений, а также студентам высших учебных заведений. **Выводы.** Представленный анализ нормативно-методологического обеспечения калибровки измерительных систем позволил выявить отечественные нормативные документы, гармонизированные с международными, а также документы, требующие обновления.

A b s t r a c t. Background. In accordance with existing regulations, domestic standards are presented analysis and definitions of measuring systems; to harmonize the term with the definition in international standards. **Materials and methods.** It's considered a radical change of the definition «calibration» with the adoption of the Federal law №102. **Results.** We investigated the issue of calibration of measuring systems into the domestic regulatory framework and its harmonization with the accepted international methodology. The article presents the main terminological, methodological, algorithmic calibration procedure and estimation of measurement uncertainty of measurement systems. In the article given the list of existing normative documents that regulating the calibration of the measuring systems. The article may be of interest to specialists in the field of metrological provision of measuring instruments, as well as students of higher educational institutions. **Conclusions.** Presents an analysis of normative-methodological support for calibration of measurement systems revealed national normative documents, harmonized with international, as well as documents requiring updates.

К л ю ч е в ы е с л о в а: измерительная система, калибровка, неопределенность измерений, погрешность измерений.

Key words: measuring system, calibration, measurement uncertainty, measurement error.

Действующая нормативно-техническая документация государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ) выделяет в качестве разновидности средств измерений измерительные системы [1, п. 6.1 Примечание; 2, п. 3.1 Примечание; п. 4.1], для которых регламентированы требования и метрологические процедуры в ГОСТ Р 8.596 [2].

В соответствии с ГОСТ Р 8.596 [2, п. 3.1] под **измерительной системой** (ИС) понимается совокупность измерительных, связующих, вычислительных компонентов, образующих измерительные каналы, и вспомогательных устройств (компонентов ИС), функционирующих как единое целое, предназначенных для:

- получения информации о состоянии объекта с помощью измерительных преобразований в общем случае множества изменяющихся во времени и распределенных в пространстве величин, характеризующих это состояние;

- обработки результатов измерений;

- регистрации и индикации результатов измерений и результатов их обработки;

- преобразования этих данных в выходные сигналы системы в разных целях.

ИС обладают основными признаками средств измерений и являются их разновидностью.

В целях гармонизации с международной терминологией проанализируем определение ИС по другим действующим нормативным документам.

Согласно Международному словарю по метрологии VIM3 [3, ст. 3.2 (4.5)]: «Измерительная система – набор из одного или более средств измерений, а часто и других устройств, включая реактивы и источники питания, собранный и приспособленный для получения информации об измеренных значениях величин в пределах установленных интервалов для величин указанного рода.

Примечание – ИС может состоять только из одного средства измерений».

Согласно РМГ 29-2013 [1, п. 6.3]: «Измерительная система – совокупность средств измерений и других средств измерительной техники, размещенных в разных точках объекта измерения, функционально объединенных с целью измерений одной или нескольких величин, свойственных этому объекту».

Согласно Федеральному закону «Об обеспечении единства измерений» от 26.08.2008 №102-ФЗ [4, ст. 2, п. 23]: «Технические системы и устройства с измерительными функциями – технические системы и устройства, которые наряду с основными функциями выполняют измерительные функции». Но в разделе 1 ГОСТ Р 8.596 [2] отмечается, что «измерительные системы могут быть использованы как автономно, так и в составе более сложных структур (информационно-измерительных систем: систем контроля, диагностирования, распознавания образов, испытательного оборудования, а также автоматических систем управления технологическими процессами). В таких сложных структурах измерительная система может быть выделена на функциональном уровне». Таким образом, в терминологии действующего Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» от 26.08.2008 № 102-ФЗ [4] перечисленные «более сложные структуры» – не что иное, как технические системы с измерительными функциями. Эти технические системы имеют свое наименование, на них существует документация, в которой ИС обычно не выделена ни на функциональном уровне, ни на каком другом уровне. На ИС в отличие от указанных систем обычно не существует документации [5, с. 11].

Таким образом, информационно-измерительные системы, системы контроля, системы диагностики, системы распознавания образов, испытательное оборудование, системы управления технологическими процессами – все это технические системы с **измерительными функциями** [5, с. 14].

Говоря о различии между информационной и измерительной системами, следует подчеркнуть следующее.

Если измерения заканчиваются получением кода в первичном измерительном преобразователе, который далее передается, хранится и применяется без каких-либо преобразований, то в этом случае ИС нет, так как отсутствует неотъемлемый компонент ИС – вычислительный, и измерения не автоматизированы. В этом случае есть не измерительная, а информационная система [5, с. 16].

Если в вычислительном компоненте системы осуществляется преобразование выходных кодов первичного измерительного преобразователя (например, масштабирование результатов измерений, статистическая обработка результатов измерений, обработка результатов прямых измерений нескольких первичных измерительных преобразователей для получения результата косвенного измерения), то имеем не информационную, а измерительную систему [5, с. 17].

Представленный анализ терминологического определения ИС, а также отмеченное различие между информационной и измерительной системами позволяют четко выделить среди их множества системы, к которым может быть применена процедура калибровки.

Необходимость рассмотрения нормативно-методологического обеспечения процедуры калибровки обусловлена тем, что принятие Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» (№102-ФЗ от 26.06.2008 г.) радикальным образом меняет к ней отношение. Основной метрологический документ страны наполняет новым смыслом термин «калибровка»:

«Калибровка средств измерений – совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик».

Изменение содержания процедуры калибровки означает, что теперь результатом калибровки средств измерений являются лишь действительные значения их метрологических характеристик (МХ), определенные на момент проведения калибровки [6, с. 116–128]. Теперь, в рамках нового Закона, калибровка средств измерений отнюдь не аналог ведомственной поверки (как было ранее). Принятие Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» (№ 102-ФЗ от 26.06.2008) коренным образом меняет отношение к процедурам калибровки, делает ее широко доступным способом повышения точности и в отличие от отмененного ФЗ № 4871-1 от 27.04.1993, не подменяет калибровку средства измерений его поверкой. Постановление Правительства РФ № 311[7] предусматривает, что результаты калибровки могут быть использованы при поверке, если калибровка выполнена организацией, аккредитованной в национальной системе аккредитации.

Процедура калибровки многовариантна. Укрупненно можно выделить следующие разновидности:

1) с введением поправок на систематическую составляющую погрешности средства измерений (градуировка средства измерений);

2) без введения поправок на систематическую составляющую погрешности средства измерений;

3) сравнение действительных значений характеристик погрешности средства измерений с допускаемыми значениями (зарубежные приборостроительные фирмы часто рассматривают операцию калибровки как операцию допускового (измерительного) контроля, имеется аналогичная и отечественная практика).

В настоящее время действуют три определения понятия калибровки СИ:

1. Наиболее часто применяемое определение из ст. 2 ФЗ «Об обеспечении единства измерений» [4]:

«Калибровка средств измерений – совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик».

2. РМГ 29-2013. «ГСИ. Основные термины и определения» определяет калибровку средств измерений как [1, п. 9.6]:

«Калибровка средств измерений – совокупность операций, устанавливающих соотношение между значением величины, полученным с помощью данного средства измерений и соответствующим значением величины, определенным с помощью эталона с целью определения метрологических характеристик этого средства измерений».

3. Международным словарем [3, п. 2.39 (6.11)] понятие «калибровка» трактуется с позиций неопределенности измерений, обеспеченной рабочими эталонами и присущей калибруемым средствам измерений; международная дефиниция слова расширена необходимостью прослеживаемости единицы величины до национального эталона и оценивания неопределенности измерений при калибровке:

«Калибровка – операция, в ходе которой при заданных условиях на первом этапе устанавливают соотношение между значениями величин с неопределенностями измерений, которые обеспечивают эталоны, и соответствующими показаниями с присущими им неопреде-

ленностями, а на втором этапе на основе этой информации устанавливают соотношение, позволяющее получать результат измерения исходя из показания».

Анализ терминологического определения дефиниции «калибровка» показал, что, несмотря на существенные различия, все эти три действующие определения не противоречат друг другу. Первое определение из ФЗ «Об обеспечении единства измерений» формулирует цель калибровки. Третье определение из Международного словаря по метрологии VIM3 содержит функциональное описание процедуры. Определение из РМГ-29 содержит элементы обоих вышеупомянутых определений. Однако международное определение понятия калибровки содержит следующую новацию: обязательную оценку неопределенности результатов.

Проанализируем нормативные документы, регламентирующие калибровку измерительных систем.

ГОСТ Р 8.879-2014 [8] вводит понятие «целевой неопределенности» (п. 2.5) – «неопределенность измерений, заранее установленная как верхний предел и принятая, исходя из предполагаемого использования результатов измерений».

Рекомендации Р РСК 002-2006 [9] (нормативный документ, имеющий статус действующего, разработан в соответствии с требованиями в настоящее время замененного ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025/2000) требуют обязательным включение раздела «Неопределенность измерений» при проведении совместных работ с зарубежными странами (п. 3.16), но в то же время допускают два подхода к оцениванию параметров (характеристик) точности измерений: погрешности и неопределенности (п. 3.16.1).

Межгосударственный стандарт РМГ 91-2009 [10] содержит рекомендации и основные принципы совместного применения понятий «погрешность измерений» и «неопределенность измерений» и производных от них понятий в различных метрологических задачах. Понятие «погрешность измерения» может быть использовано, когда имеется единственное опорное значение величины, которое появляется при выполнении калибровки посредством эталона с регламентированным значением величины, имеющим незначительную неопределенность измерения, или если дано приписанное (стандартизованное) значение величины. Результаты измерений в большинстве метрологических ситуаций характеризуются неопределенностью, а нормативы точности средств измерений, измерительных и контрольных процедур характеризуются погрешностью. Таким образом, понятия «неопределенность» и «погрешность» гармоничны без взаимного противопоставления и исключения одного из них [11, 12].

Метрологическая прослеживаемость единицы величины [1, п. 9.2] при калибровке ИС предполагает наличие трех элементов:

- установленную и документированную калибровочную иерархию эталонов единицы величины;
- передачу единицы величины калибруемому каналу ИС и установление поправок в каждой калибруемой точке диапазона измерений;
- оценку неопределенности измерений.

Метрологическая прослеживаемость единицы величины при калибровке регламентируется межгосударственными стандартами [13–15].

Назначение межкалибровочного интервала ИС регламентируется межгосударственным стандартом РМГ 74-2004 [16], в котором (по-прежнему) калибровка отождествляется с поверкой.

ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2006 [13], являющийся идентичным по отношению к международному стандарту ИСО/МЭК 17025:2005, законодательно закрепил необходимость наличия процедур оценивания неопределенности измерений для международного признания результатов калибровок – условия международной системы обеспечения единства измерений.

Калибровка может быть выражена как утверждение, функция калибровки, диаграмма калибровки, калибровочная кривая или таблица калибровки. В некоторых случаях она может включать аддитивную или мультипликативную поправку к показаниям с соответствующей неопределенностью [3, п. 2.39 (6.11), Примечание 1]. Ее не следует путать ни с регулировкой ИС, часто ошибочно называемой «самокалибровкой», ни с верификацией калибровки [3, п. 2.39 (6.11), Примечание 2]. РМГ 29-2013 [1, п. 9.6 Примечание 1] диаграмму калибровки рассматривает как МХ, несущую информацию об инструментальной неопределенности измерений.

Оценивание неопределенности измерений при калибровке ИС регламентировано нормативным документом [14], а также семейством гармонизированных с международными стандартов [17–21].

ГОСТ Р 8.879-2014 [8, п. 3.4] регламентирует использовать методики калибровки, отвечающие потребностям клиентов. Учитывая желание пользователей получить калибровочную зависимость именно в тех условиях, в которых производится эксплуатация ИС, следует отметить актуальность и целесообразность разработки методик калибровки ИС в рабочих условиях и лоббирования отечественных разработок в международную метрологическую практику [22, 23].

Представленный анализ выполнен в связи с кардинальным изменением с принятием ФЗ № 102 содержания термина «калибровка». Выполненный анализ нормативно-методологического обеспечения калибровки измерительных систем позволил выявить нормативные документы и положения в них, гармонизированные с международными, а также, напротив, указал на нормативные документы, требующие обновления.

Библиографический список

1. РМГ 29-2013. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2014. – 55 с.
2. ГОСТ Р 8.596-2002. ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002.
3. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины : пер. с англ. и фр. / ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, БелГИМ. – СПб. : НПО Професионал, 2010. – 84 с.
4. Об обеспечении единства измерений : федер. закон № 102-ФЗ от 26.06.2008.
5. Данилов, А. А. Метрологическое обеспечение измерительных систем/ А. А. Данилов. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Политехника Сервис, 2014. – 189 с.
6. Данилов, А. А. Развитие измерительных систем и их метрологического обеспечения / А. А. Данилов // Метрология. – 2016. – № 3. – С. 3–12.
7. Об утверждении Положения о признании результатов калибровки при поверке средств измерений в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений : постановление Правительства РФ № 311 от 02.04.2015.
8. ГОСТ Р 8.879-2014. ГСИ. Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и оформлению. – М. : Стандартинформ, 2015. – 8 с.
9. Р РСК 002-2006. Российская система калибровки. Основные требования к методикам калибровки в Российской системе калибровки. – М., 2006. – 20 с.
10. РМГ 91-2009. ГСИ. Совместное использование понятий погрешность измерения и неопределенность измерения. Общие принципы. – М. : Стандартинформ, 2009. – 12 с.
11. Ординарцева, Н. П. Погрешность неопределенности или неопределенность погрешности / Н. П. Ординарцева // Законодательная и прикладная метрология. – 2012. – № 6. – С. 41–44.
12. Ординарцева, Н. П. Погрешность неопределенности или неопределенность погрешности: две концепции / Н. П. Ординарцева // Standart – техника журналы. – 2013. – № 2. – С. 30–33.
13. ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – М. : Стандартинформ, 2010. – 70 с.
14. РМГ 115-2011. ГСИ. Калибровка средств измерений. Алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределенности. – Минск : Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2012. – 48 с.
15. РМГ 120-2013. ГСИ. Общие требования к выполнению калибровочных работ. – М. : Стандартинформ, 2015. – 23 с.
16. РМГ 74-2004. ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений. – М. : Стандартинформ, 2006. – 24 с.
17. ОКРМ 104:2009. Введение к «Руководству по выражению неопределенности измерения» и сопутствующим документам. Оценивание данных измерений / пер. с англ. под науч. ред. д.т.н., проф. В. А. Слаева, д.т.н. А. Г. Чуновкиной. – СПб. : Професионал, 2011. – 58 с.
18. ГОСТ Р 54500.1-2011. Руководство ИСО/МЭК 98-1:2009. Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководства по неопределенности измерения. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200088854>

19. ГОСТ Р 54500.3-2011. Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. – М. : Стандартинформ, 2012. – 107 с.
20. ГОСТ Р 54500.3.1-2011. Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008. Дополнение 1: 2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 1. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200088856>
21. ГОСТ Р 54500.3.2-2013. Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008. Дополнение 2: 2011. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 2. Обобщение на случай произвольного числа выходных величин. – М. : Стандартинформ, 2015. – 74 с.
22. Danilov, A. A. Calibration Method of Measuring Instruments in Operating Conditions / A. A. Danilov, M. V. Berzhinskaya, Yu. V. Kucherenko, N. P. Ordinartseva // Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing X. – Singapore : World Scientific Publishing Company, 2015. – P. 149–156.
23. Danilov, A. A. Calibration of measuring instruments under working conditions // A. A. Danilov, Yu. V. Kucherenko, M. V. Berzhinskaya, N. P. Ordinartseva // Measurement Techniques. – 2014. – Vol. 57, iss. 3. – P. 228–230.

Ординарцева Наталья Павловна

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

Ordinartseva Natalia Pavlovna

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

Баранов Андрей Андреевич

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

Baranov Andrey Andreevich

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

Рыбаков Илья Михайлович

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

Rybakov Ilya Mikhailovich

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

УДК 006.91

Ординарцева, Н. П.

Нормативно-методологическое обеспечение калибровки измерительных систем / Н. П. Ординарцева, А. А. Баранов, И. М. Рыбаков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 22–27. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-3.

Н. П. Ординарцева

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕДАЧИ В РАБОЧИХ УСЛОВИЯХ ЕДИНИЦЫ ВЕЛИЧИНЫ КАЛИБРУЕМОМУ КАНАЛУ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

N. P. Ordinartseva

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY TRANSMISSION IN THE WORKING CONDITIONS OF UNIT VALUES TO THE CALIBRATED CHANNEL MEASURING SYSTEM

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Исследуется возможность передачи единицы величины в рабочих условиях калибруемому измерительному каналу измерительной системы (ИК ИС). **Материалы и методы.** С целью доказательства возможности передать единицу величины в условиях уникально сложившейся совокупности влияющих величин в момент калибровки ИК ИС проведен вычислительный эксперимент с использованием метода Монте-Карло для случаев комплектной калибровки простого ИК, комплектной калибровки сложного ИК в случае одной или двух влияющих величин. Влияющими величинами выбраны температура, вносящая наибольший вклад в погрешность передачи единицы величины, и время, обуславливающее временную нестабильность эталонов. **Результаты.** Полученные результаты эксперимента, приведенные в статье, подтвердили возможность передачи единицы величины в рабочих условиях эксплуатации измерительной системы и калибровки ИК ИС в этих условиях. Это позволит применять калибровку ИК ИС как малозатратный способ повышения точности ИС без демонтажа ИК и его транспортировки в нормальные условия калибровочной лаборатории. **Выводы.** Полученные результаты доказали возможность калибровки ИК ИС в рабочих условиях.

A b s t r a c t. Background. The possibility of transfer of units of value in the working conditions of the calibrated measuring channel of the measuring system is research (MC MS). **Materials and methods.** In order to prove the possibility to transfer unit values in the unique conditions prevailing totality of the influence quantities at the time of calibration of the measuring channel of the measuring system (MC MS) carried out computational experiment using Monte-Carlo simulation for the cases of complete calibration of the simple MC MS, complete calibration of the complex MC MS in the case of one or two influencing factors. Influence factors selected temperature, contributed most to the error transmission unit size, and time, causing temporary instability of the standards. **Results.** The obtained results of the experiment presented in the paper confirmed the possibility of transferring units of value in the working conditions of the measuring system and calibration of the MC MS in these conditions. **Conclusions.** The obtained results proved the possibility of calibration of the in the working conditions.

К л ю ч е в ы е с л о в а: калибровка измерительных каналов измерительных систем, поправка, стационарный эталон, переносной (транспортируемый) эталон, прослеживаемость единицы величины.

Key words: calibration of measuring channels of measuring systems, the correction, stationary standard, portable (transportable) standard, the traceability unit value.

Пользователи средств измерений (СИ) прибегают к калибровке как к способу повышения точности: найденная по результатам калибровки поправка повышает точность калибруемого СИ, приближая ее к точности эталона (с соответствующей неопределенностью измерений при калибровке). Определяемая разность показаний эталона и калибруемого СИ, документально подтвержденная связь эталона с государственным первичным эталоном (ГПЭ) обеспечивают прослеживаемость единицы величины [1, п. 9.2]. Последнее обеспечивает значимую роль и место калибровки в системе обеспечения единства измерений.

Прослеживаемость единицы величины иллюстрирует рис. 1. Передача единицы величины по поверочной схеме является процедурным вопросом; метрологическая прослеживаемость единицы величины как связь переносного эталона с ГПЭ интегрировала в себя неопределенности эталонов на всех уровнях калибровки, начиная с первичного эталона.

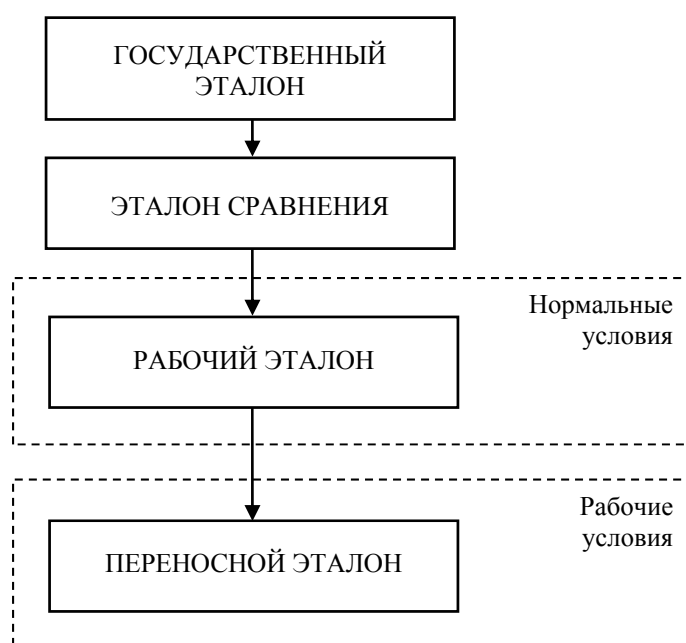


Рис. 1. Прослеживаемость единицы величины

Для калибровки СИ в рабочих условиях эксплуатации предложен новый способ, который состоит в проведении двухэтапной процедуры передачи единицы величины СИ с использованием метода замещения, реализуемого с помощью переносного эталона, применяемого в указанных условиях, и стационарного эталона, находящегося в лабораторных условиях. Предложенный способ подробно описан в [2, 5]. Известен способ передачи единицы величины в рабочих условиях, когда используют переносной (транспортируемый [1, п. 8.15]) эталон, поправка для которого находится при сличении стационарного и переносного эталонов в нормальных условиях, но найденная поправка применяется для условий сложившейся совокупности влияющих величин рабочих условий. Предложенный способ [1–5] позволяет находить поправку воспроизведения единицы величины переносным эталоном именно для уникально сложившейся совокупности влияющих величин, тем самым обеспечивая повышение точности передачи единицы величины калибруемому ИК ИС.

Для доказательства работоспособности и применимости предложенного нового метода [2–5] выполнено моделирование Δ_{py}, ∇_{py} (погрешности / поправки) передачи единицы величины калибруемому ИК ИС в условиях, отличных от нормальных [6], методом Монте-Карло. В статье предлагается описание выполненного эксперимента и приводятся полученные результаты, доказавшие возможность выполнения калибровочных работ ИС и их каналов в ра-

бочих условиях эксплуатации без демонтажа и транспортировки элементов системы в нормальные условия калибровочной лаборатории.

Метод Монте-Карло [7] является численным методом моделирования случайных стохастических процессов и лежит на стыке теоретического и экспериментального исследования. В качестве объекта исследования выбрана ИК ИС с токовым входом (входами) и рассмотрены случаи:

- комплектной калибровки простого ИК ИС;
- комплектной калибровки сложного ИК ИС.

В вычислительном эксперименте, реализующемся в работах [2–5], в качестве стационарного эталона использован мультиметр цифровой прецизионный модели Fluke 8508A; в качестве переносного эталона – калибратор многофункциональный МСХ-II-R. Для измерений температуры рабочих условий использован термогигрометр Ива-6Н, а для воспроизведения температуры рабочих условий (для переносного эталона – калибратор многофункционального МСХ-II-R) – испытательная камера WK3-340.70.

Эксперимент выполнен при следующих условиях. Температура окружающей среды, в которой находился калибруемый ИК, в процессе калибровки была в диапазоне $\Theta \in [34,8; 35,2]$ °С. При межповерочном интервале стационарного эталона (один год) предполагалось, что сличение стационарного и переносного эталонов выполнялось на 200-й день от даты последней поверки стационарного эталона, а с момента работы переносного эталона в рабочих условиях до его сличения со стационарным эталоном прошел один день. Калибруемая точка диапазона измерений ИК ИС – 10 мА.

Схема комплектной калибровки простого ИК в рабочих условиях эксплуатации ИС показана на рис. 2.

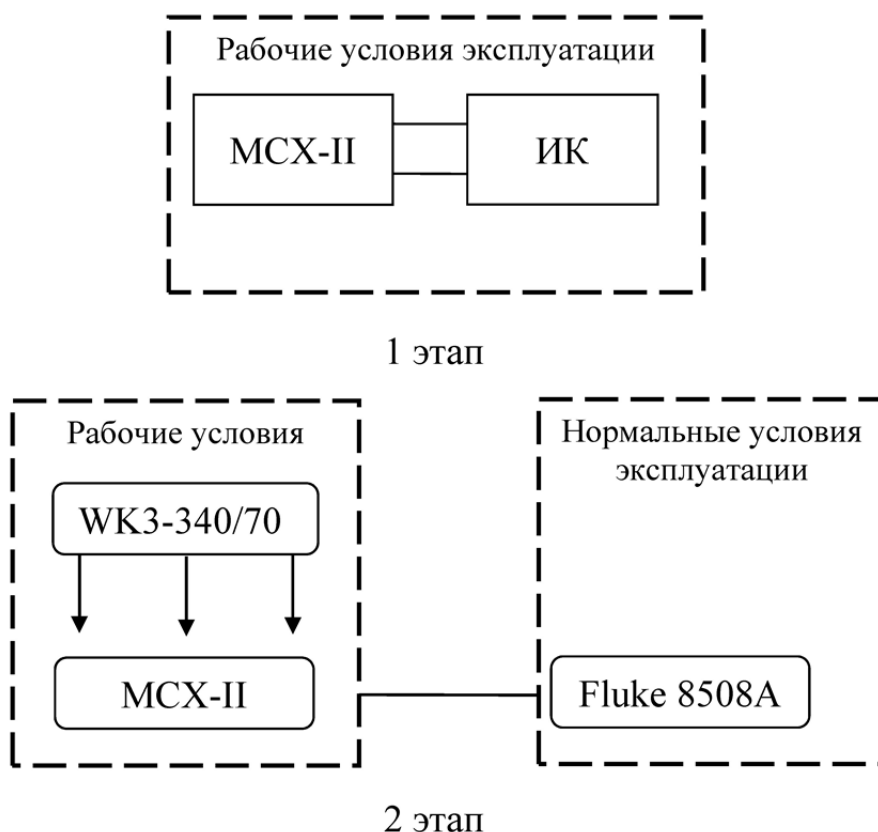


Рис. 2. Комплектная калибровка простого ИК в рабочих условиях

Этап 1. С помощью переносного эталона (калибратора многофункционального МСХ-II-R) осуществляем воспроизведение силы постоянного тока, значение которого соответствует калибруемой точке 10 мА; сигнал подаем на вход калибруемого ИК. С помощью термогигро-

метра Ива-6Н осуществляем измерение температуры рабочих условий, которое, предположим, оказалось равно $\Theta = (35,0 \pm 0,3) ^\circ\text{C}$. Выполняем калибровочные работы ИК.

Модель калибровки на этапе 1 представим следующим алгоритмическим оператором. Переносной эталон МСХ-II-R воспроизводит силу постоянного тока с погрешностью, систематическую составляющую которой примем равной $\varepsilon_{\text{сист}} \in [-0,4\Delta_{\text{осн}}, +0,4\Delta_{\text{осн}}]$, случайную – $\varepsilon_{\text{случ}} \in [-0,5\Delta_{\text{осн}}, +0,5\Delta_{\text{осн}}]$. С учетом допускаемой основной погрешности калибратора многофункционального модели МСХ-II-R $\varepsilon_{\text{сист}} \in [-0,0015; 0,0015]$ мА в модели примем равномерный закон распределения $\varepsilon_{\text{сист}}; \varepsilon_{\text{случ}} \in [-0,0019; 0,0019]$ мА, примем нормальный закон распределения $\varepsilon_{\text{случ}}$. Коэффициент температурной составляющей дополнительной погрешности примем в модели равным $\alpha \in \left[-0,5 \frac{\Delta_{\text{осн}}}{10 ^\circ\text{C}}, +0,5 \frac{\Delta_{\text{осн}}}{10 ^\circ\text{C}}\right]$ или $\alpha \in [-0,00019; 0,00019]$ мА/°C,

распределение равномерное, температура находится в диапазоне $\Theta \in [34,8; 35,2]$ °C, распределение нормальное. Для минимизации случайной составляющей погрешности проводим 4-кратное измерение.

Согласно модели источниками неопределенности на этапе 1 калибровки будут:

- погрешность воспроизведения силы постоянного тока калибратором многофункциональным модели МСХ-II-R;
- дополнительная погрешность от температуры воспроизведения силы постоянного тока калибратором многофункциональным модели МСХ-II-R;
- изменение температуры рабочих условий в течение этапа 1 калибровочного эксперимента.

Вычислительный эксперимент методом Монте-Карло. Генерируем массив случайных чисел, используя функцию «Генерация случайных чисел» из пакета «Анализ данных», подключенного в качестве надстройки к основной программе *Microsoft Office Excel*.

Матрица плана эксперимента этапа 1 имеет вид

$$X = \begin{pmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \dots & X_{1,19} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \dots & X_{2,19} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{30000,1} & X_{30000,2} & \dots & X_{30000,19} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где X_{ij} означает i -ю реализацию j -го фактора: $i = 1, \dots, 30\,000$; $j = 1, \dots, 19$ и представлена в таблице *Excel* соответственно столбцами A–S (рис. 3). В таблице *Excel* (см. рис. 3) результаты опытов представлены соответственно столбцами:

X1(A) – генерация $\varepsilon_{\text{сист}} \in [-0,0015; 0,0015]$ мА, распределение равномерное;

X2(B) ÷ X5(E) – генерация $\varepsilon_{\text{случ}}$ в 1÷4-м измерениях, $\varepsilon_{\text{случ}} \in [-0,0019; 0,0019]$ мА, распределение нормальное;

X6(F) – генерация коэффициента температурной составляющей дополнительной погрешности α , $\alpha \in [-0,00019; 0,00019]$ мА/°C, распределение равномерное;

X7(G) ÷ X10(J) – изменение температуры рабочих условий в течение этапа 1 калибровочного эксперимента, распределение нормальное;

X11(K) ÷ X14(N) – температурная составляющая дополнительной погрешности в 1÷4-м измерениях;

X15(O) ÷ X18(R) – суммарная погрешность в 1÷4-м измерениях;

X19(S) – оценка суммарной погрешности в 1÷4-м измерениях;

X(T) – опорный сигнал, воспроизводимый переносным эталоном МСХ-II-R, подаваемый на вход калибруемого ИК.

Microsoft Excel - Книга9.11:слож1в-на1этап

А1 -0,000353999450666829

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	-0,00035	-0,00052	-0,00016	0,000318	-0,00073	1,28E-05	35,05212	35,05341	34,98571	35,05029	0,000103	0,00010
2	-0,0012	0,000419	0,000373	-0,00045	0,00077	-0,00016	34,95518	35,01706	35,05008	35,07428	-0,00127	-0,0012
3	0,000289	-0,00048	0,000229	0,000299	0,00117	-4,2E-05	34,92704	34,93722	35,04498	34,99073	-0,00033	-0,0003
4	0,001197	0,000113	-0,00038	-1,6E-05	-0,00034	8,51E-05	35,0283	35,03897	34,99048	34,99163	0,000683	0,00068
5	0,001154	-1,9E-05	1,01E-05	-0,00184	-0,0011	-0,00015	35,0735	35,09148	35,02689	35,06048	-0,00124	-0,0012
6	0,001375	-7,4E-05	-0,00145	-0,00065	0,00062	0,000137	34,97984	34,9887	34,93536	34,96155	0,001092	0,00108
7	-0,00146	-0,00072	0,000186	0,000263	-0,00054	-2,4E-05	35,01171	34,95166	35,01829	35,00433	-0,00019	-0,0001
8	-0,00028	0,000386	0,0005	0,000326	0,000656	-0,00016	34,87005	34,96542	35,01935	34,97783	-0,00128	-0,0012
9	0,00109	5,8E-05	0,000553	-0,00093	-0,00033	5,16E-05	34,98259	35,01422	34,97824	34,93515	0,000412	0,0004
10	-0,00108	-0,00027	-0,00055	-3,7E-06	-0,00017	-6,3E-05	34,93223	34,90272	35,10722	34,92681	-0,0005	-0,0005
11	-0,00076	0,000181	-0,00145	-0,00075	-0,00041	-0,00013	35,00074	35,03866	35,02661	35,02375	-0,00102	-0,0010
12	-0,00136	-0,00043	-0,0007	-0,00012	-0,00026	-0,00014	34,9785	35,01662	35,05851	35,09282	-0,00114	-0,0011
13	-0,0014	0,001271	-0,00093	0,000812	-0,0005	9,59E-05	34,931	35,00813	34,95858	34,91615	0,000761	0,00076
14	-0,00101	-0,00039	0,000379	-0,00068	-0,00047	-6,9E-05	35,04461	34,96189	34,97076	35,05813	-0,00056	-0,0005
15	-0,00084	-0,00036	0,000335	-0,00028	0,000425	0,000118	34,98809	35,05052	35,04338	34,98668	0,00094	0,0009
16	-0,00145	-0,00092	-4,7E-05	0,000332	0,000198	4,06E-05	35,03053	34,97419	34,99798	34,97839	0,000326	0,00032
17	-0,00064	-0,00062	-0,00114	-0,00043	0,000507	-4,3E-05	34,98606	35,0087	34,98997	35,04537	-0,00034	-0,0003
18	-0,00047	-0,00066	-0,00028	0,000389	-0,00063	-0,00017	34,94218	34,99245	34,92035	35,01766	-0,00131	-0,0013
19	0,000161	-0,00074	-0,00059	-0,00076	-0,00039	0,000138	34,8793	35,07691	35,03491	34,99766	0,001089	0,0011
20	-0,00043	0,000566	0,000676	-0,00029	-0,0003	0,000117	34,86594	35,04134	35,15187	35,05519	0,000919	0,0009
21	-0,00038	-0,00062	-0,00013	8,44E-05	-0,00011	0,000177	35,11331	35,05038	35,07694	35,03267	0,001437	0,0014
22	-0,00043	2,79E-05	0,000205	-0,0012	0,000179	0,000185	35,02743	34,98176	35,06198	35,14188	0,001483	0,0014
23	0,001231	0,000306	0,000462	-8,6E-05	-0,00083	1,49E-05	35,12187	34,8946	34,88226	34,97766	0,000121	0,0001
24	-0,0001	0,000316	-0,0005	-0,00093	-0,00022	-1E-04	34,99824	35,04906	34,89334	34,97441	-0,0008	-0,0008
25	-0,00022	-0,00082	-0,0005	0,000601	-4,4E-05	0,000182	35,15364	34,95665	34,86387	35,024	0,00148	0,0014

Готово

Microsoft Excel - Книга9.11:слож1в-на1этап

А1 -0,000353999450666829

	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA
1	6,6979E-05	-0,001	-0,00053	9,999473	-4,7E-05	9,999953	0,00048		-0,00361	0,003838413	расш неоп-т
2	-0,00304155	-0,00161	-0,00212	9,997875	-0,00016	9,99984	0,001965		-0,00348		
3	0,00026108	0,001158	0,000281	10,00028	3,86E-05	10,00004	-0,00024		-0,00336		
4	0,00189181	0,001478	0,001686	10,00169	0,00016	10,00016	-0,00153		-0,00335	7,99043E-07	среднее
5	-0,00188846	-0,0013	-0,00091	9,999089	0,000154	10,00015	0,001064		-0,0033		
6	0,00187846	0,003228	0,002137	10,00214	0,000183	10,00018	-0,00195		-0,00327		
7	-0,0013923	-0,00218	-0,00185	9,998149	-0,00019	9,999806	0,001657		-0,00327		
8	-0,00114619	-0,00093	-0,00111	9,998888	-3,7E-05	9,999963	0,001075		-0,00327		
9	0,00057881	0,001228	0,001358	10,00136	0,000145	10,00015	-0,00121		-0,00317		
10	-0,00158216	-0,00177	-0,00182	9,998181	-0,00014	9,999855	0,001675		-0,00317		
11	-0,00238979	-0,0021	-0,0023	9,997695	-0,0001	9,999898	0,002203		-0,00315		
12	-0,00262411	-0,00268	-0,00283	9,997169	-0,00018	9,999818	0,002649		-0,00314		
13	0,00027252	-0,00112	-0,00042	9,999577	-0,00019	9,999813	0,000236		-0,00314		
14	-0,00224261	-0,00205	-0,00185	9,998147	-0,00013	9,999866	0,001719		-0,00313		
15	-0,00019336	0,000473	0,000136	10,00014	-0,00011	9,999888	-0,00025		-0,00312		
16	-0,00077612	-0,00092	-0,00124	9,998756	-0,00019	9,999807	0,001051		-0,00311		
17	-0,00142127	-0,00045	-0,00139	9,998607	-8,6E-05	9,999914	0,001307		-0,00311		
18	-0,00150447	-0,00246	-0,00204	9,997964	-6,3E-05	9,999937	0,001974		-0,00309		
19	0,00052907	0,000898	0,000649	10,00065	2,15E-05	10,00002	-0,00063		-0,00308		
20	0,00014558	0,00014	0,00062	10,00062	-5,7E-05	9,999943	-0,00068		-0,00308		
21	0,00104937	0,000972	0,000776	10,00078	-5,1E-05	9,999949	-0,00083		-0,00308		
22	-0,0001811	0,001392	0,000865	10,00086	-5,8E-05	9,999942	-0,00092		-0,00308		
23	0,00126522	0,00051	0,001308	10,00131	0,000164	10,00016	-0,00114		-0,00308		
24	-0,00176881	-0,00111	-0,00124	9,998762	-1,4E-05	9,999986	0,001225		-0,00308		
25	0,00199063	0,001089	0,001017	10,00102	-3E-05	9,999997	-0,00105		-0,00308		

Готово

Готово

29989	-0,00042	0,00126	-0,0005	0,000223	0,0002	2,01E-06	34,97427	34,96933	34,92599	35,00216	1,6E-05	1,61
29990	-0,00045	0,00074	-0,00037	-3,6E-05	0,00075	0,000142	35,07452	34,90784	35,09504	34,9742	0,00115	0,001
29991	-0,00048	0,000741	-0,00026	-0,00071	-0,0002	-0,00012	34,93783	34,98827	34,91635	35,04668	-0,00098	-0,0009
29992	-0,00131	-0,00036	0,000896	6,26E-05	-0,00046	0,000175	34,97159	35,12828	35,06509	35,03425	0,001397	0,001
29993	0,000208	0,000466	0,000532	-0,00095	0,000311	-7,9E-05	34,91735	35,03182	35,00478	34,92424	-0,00062	-0,0006
29994	-0,0007	0,00108	-0,00111	-0,00069	0,00021	-1E-05	34,89713	35,04833	34,93195	34,97828	-8,1E-05	-8,21
29995	-0,00054	0,000426	0,001215	0,000334	-0,00038	-0,00012	35,05867	35,03119	35,01356	35,03484	-0,00096	-0,0009
29996	0,000965	0,001314	0,000789	0,001734	-0,00044	-2,4E-05	35,11106	35,00681	35,02729	34,84287	-0,0002	-0,0002
29997	5,61E-05	0,000913	-9,3E-05	0,000353	-0,00048	1,7E-05	34,94027	34,98093	34,88971	34,96167	0,000135	0,0001
29998	0,00083	-0,00042	0,00099	8,14E-05	-0,00034	-0,00016	35,0055	34,97423	34,98151	34,92273	-0,00129	-0,0012
29999	0,000362	-0,00097	-0,00037	-0,00051	-1E-04	-0,00013	35,05608	34,91384	34,93703	34,96865	-0,00106	-0,0010
30000	0,000717	0,001123	-7E-05	0,00057	-0,00039	6,77E-05	34,94835	34,87268	35,07917	35,14006	0,000538	0,0005
30001												
29989	-0,0002	-0,00011	9,999891	-5,6E-05	9,999944	5,25E-05		0,003272				
29990	0,001519	0,001037	10,00104	-6E-05	9,99994	-0,0011		0,003276				
29991	-0,00181	-0,00155	9,998446	-6,4E-05	9,999936	0,001491		0,003276				
29992	-0,00038	0,000188	10,00019	-0,00017	9,999825	-0,00036		0,003294				
29993	-0,00012	-0,00033	9,999673	2,77E-05	10,00003	0,000355		0,003357				
29994	-0,00056	-0,0009	9,999096	-9,3E-05	9,999907	0,000811		0,003364				
29995	-0,00179	-0,00103	9,998969	-7,2E-05	9,999928	0,000959		0,003373				
29996	0,00033	0,00161	10,00161	0,000129	10,00013	-0,00148		0,003376				
29997	-0,00028	0,000369	10,00037	7,48E-06	10,00001	-0,00036		0,003396				
29998	-0,0008	-0,00042	9,999584	0,000111	10,00011	0,000527		0,003407				
29999	-0,00074	-0,00121	9,998795	4,82E-05	10,00005	0,001253		0,003474				
30000	0,00088	0,00152	10,00152	9,56E-05	10,0001	-0,00142		0,003477				
30001												

Готово

Рис. 3. Фрагменты таблицы Excel с матрицей плана эксперимента комплектной калибровки простого ИК при одном влияющем факторе

Этап 2. По окончании калибровочных работ по месту расположения ИК ИС перемещаем переносной экземпляр эталона MCX-II-R в калибровочную лабораторию. С помощью испытательной камеры WK3-340.70 воссоздаем для MCX-II-R рабочие условия с измеренным значением влияющей величины $\Theta = 35^\circ\text{C}$. Сличаем показания переносного эталона (MCX-II-R) и стационарного эталона (Fluke 8508A), обеспечивающего передачу единицы величины и ее прослеживаемость до ГПЭ. Найденную при сличении эталонов поправку $\nabla_{py} = I_0 - I_{py}$ используем для корректировки результатов калибровки, полученных на этапе 1. Определяем неопределенность поправки ∇_{py} .

Модель калибровки на этапе 2 представим следующим алгоритмическим оператором.

Переносной эталон MCX-II-R воспроизводит силу постоянного тока с погрешностью, систематическую составляющую которой примем равной $\epsilon_{\text{сист}} \in [-0,4\Delta_{\text{осн}}, +0,4\Delta_{\text{осн}}]$, случайную $-\epsilon_{\text{случ}} \in [-0,5\Delta_{\text{осн}}, +0,5\Delta_{\text{осн}}]$ или с учетом предела допускаемой основной погрешности калибратора многофункционального модели MCX-II-R $\epsilon_{\text{сист}} \in [-0,0015; 0,0015]$ мА, в модели примем равномерный закон распределения $\epsilon_{\text{сист}}$; $\epsilon_{\text{случ}} \in [-0,0019; 0,0019]$ мА, примем нормальный закон распределения $\epsilon_{\text{случ}}$. Погрешность установки температуры в испытательной камере модели WK3-340.70 (дискретность установки значения влияющей величины) согласно техническим характеристикам, $\Delta_{\text{камеры}} = \pm 0,5^\circ\text{C}$, закон распределения $\Delta_{\text{камеры}} = \pm 0,5^\circ\text{C}$ равномерный. Погрешность поддержания температуры в испытательной камере модели WK3-340.70 (неравномерность температурного поля по объему камеры) $\Delta_{2\text{камеры}} = \pm 1,5^\circ\text{C}$, закон распределения нормальный. Коэффициент температурной составляющей дополнительной погрешности примем в модели равным $\alpha \in \left[-0,5 \frac{\Delta_{\text{осн}}}{10^0\text{C}}, +0,5 \frac{\Delta_{\text{осн}}}{10^0\text{C}}\right]$ или $\alpha \in [-0,00019; 0,00019]$ мА/°C, распределение равномерное. Для минимизации случайной составляющей погрешности проводим 4-кратное измерение воспроизводимой переносным эталоном единицы величины. В соответствии с техническими характеристиками мультиметра цифрового прецизионного модели Fluke 8508A его основная погрешность $\Delta_{8508A} = [-0,0002; +0,0002]$ мА, примем закон распределения Δ_{8508A} равномерным.

Согласно модели калибровки ИК ИС источниками неопределенности на этапе 2 калибровки будут:

- погрешность воспроизведения силы постоянного тока калибратором многофункциональным модели MCX-II-R;
- погрешность установки температуры в испытательной камере модели WK3-340.70;
- погрешность поддержания температуры в испытательной камере модели WK3-340.70;
- дополнительная погрешность от температуры воспроизведения силы постоянного тока калибратором многофункциональным модели MCX-II-R;
- погрешность измерения силы постоянного тока мультиметром цифровым прецизионным модели Fluke 8508A.

Матрица плана эксперимента этапа 2 имеет вид

$$X = \begin{pmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \dots & X_{1,24} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \dots & X_{2,24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{30000,1} & X_{30000,2} & \dots & X_{30000,24} \end{pmatrix} \quad (2)$$

и представлена в таблице Excel соответственно столбцами $V \div AS$ (см. рис. 3). В таблице Excel (см. рис. 3) результаты опытов представлены соответственно столбцами: $X1(V)$ – генерация $\epsilon_{\text{сист}}$, $\epsilon_{\text{сист}} \in [-0,0015; 0,0015]$ мА, распределение равномерное;

$X2(W) \div X5(Z)$ – генерация $\varepsilon_{\text{случ}}$ в 1÷4-м измерениях, $\varepsilon_{\text{случ}} \in [-0,0019; 0,0019]$ мА, распределение нормальное;

$X6(AA)$ – генерация коэффициента температурной составляющей дополнительной погрешности α , $\alpha \in [-0,00019; 0,00019]$ мА/°C, распределение равномерное;

$X7(AB)$ – температура в камере, с погрешностью установки $\Delta_{\text{камеры}} = \pm 0,5^\circ\text{C}$, распределение равномерное;

$X8(AC) \div X11(AF)$ – погрешность поддержания температуры в испытательной камере в 1÷4-м измерениях, распределение нормальное;

$X12(AG) \div X15(AJ)$ – фактическая температура в испытательной камере;

$X16(AK) \div X19(AN)$ – дополнительная погрешность от температуры воспроизведения силы постоянного тока калибратором многофункциональным модели MCX-II-R;

$X20(AO) \div X23(AR)$ – суммарная погрешность в 1÷4-м измерениях;

$X24(AS)$ – оценка суммарной погрешности в 1÷4-м измерениях;

$X(AT)$ – сигнал, воспроизводимый переносным экземпляром эталона MCX-II-R, подаваемый на вход образцового мультиметра цифрового прецизионного модели Fluke 8508A для сличения;

$X(AU)$ – генерация основной допускаемой погрешности мультиметра цифрового прецизионного модели Fluke 8508A $\Delta_{8508A} = [-0,0002; +0,0002]$ мА, распределение равномерное;

$X(AV)$ – сигнал, воспроизводимый стационарным экземпляром эталона Fluke 8508A, сличаемый с сигналом калибратора многофункционального модели MCX-II-R;

$X(AW)$ – поправка воспроизведения единицы величины переносным экземпляром эталона MCX-II-R в рабочих условиях ∇_{py} .

Результаты выполненного эксперимента оказались следующими:

1. Случай применения известного способа калибровки, при котором переносной эталон сличают со стационарным эталоном в нормальных условиях калибровочной лаборатории.

Единица величины в рабочих условиях воспроизводится переносным эталоном MCX-II-R, и номинальный сигнал 10 мА подается на вход калибруемого ИК с погрешностью, максимальное по модулю значение которой равно 0,0037 мА, или 0,04 %. Расширенная неопределенность погрешности $U = 0,0024$ мА.

2. Применение предложенного нового способа [2–5], который основан на двухэтапной передаче единицы величины калибруемому ИК ИС с использованием метода замещения.

Нахождение поправки к значению единицы величины, воспроизводимому переносным эталоном MCX-II-R, позволяет воспроизвести единицу величины 10 мА в рабочих условиях с погрешностью, максимальное по модулю значение которой равно 0,00041 мА, или 0,004 %. Расширенная неопределенность погрешности $U = 0,00021$ мА.

Сравнение полученных результатов эксперимента показало, что применение нового способа калибровки ИК ИС позволяет уменьшить погрешность воспроизведения единицы величины и ее расширенную неопределенность почти в 10 раз. Минимизация погрешности воспроизведения единицы величины и ее расширенной неопределенности в рабочих условиях эксплуатации ИС в сравнении с известным способом достигается следующим образом.

В известном способе поправка определяется в нормальных условиях, а применяется в иных, рабочих условиях. Такая поправка не учитывает действия уникальной совокупности влияющих величин в момент калибровки ИК. Известный способ не определяет поправки для рабочих условий калибровки, что зачастую вообще делает его неприемлемым для калибровки ИК в рабочих условиях.

Предложенный новый способ позволяет найти поправку воспроизведения единицы величины переносным экземпляром эталона именно для тех условий, с той уникальной сложившейся совокупностью влияющих величин, в которой проводится калибровка ИК. Неопределенность нахождения поправки $\bar{\nabla}_{py}$ на этапе 2 предложенного способа обуславливается только неточностью воссоздания рабочих условий локально в калибровочной лаборатории. В выполненном эксперименте неточность воссоздания рабочих условий обусловлена:

– погрешностью измерения влияющих величин на этапе 1 (погрешностью измерения температуры Θ и ее изменением во время этапа 1);

– погрешностью воссоздания влияющей величины на этапе 2:

а) погрешностью установки температуры в испытательной камере,

б) погрешностью поддержания температуры в камере, т.е. неравномерностью теплового поля внутри камеры.

Достигнутая точность воспроизведения единицы величины в рабочих условиях обосновывает возможность применения и работоспособность предложенного способа для комплектной калибровки простого ИК в случае одной влияющей величины.

Далее аналогичным образом было выполнено экспериментальное исследование возможности передачи единицы величины в случае двух влияющих величин. Наряду с влияющим фактором температуры, оказывающим наибольшее влияние на точность передачи единицы величины, вторым влияющим фактором в эксперименте выбрано время. Полученные результаты экспериментальных исследований передачи единицы величины калибруемому ИК ИС в рабочих условиях при температуре вне области ее нормальных значений и с учетом нестабильности стационарного и переносного эталонов приведены в табл. 1.

Экспериментальные исследования были продолжены для случая сложного ИК ИС, реализующего косвенные измерения разности сил постоянного электрического тока, результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований передачи
единицы величины калибруемому ИК ИС в рабочих условиях

Описание эксперимента		Погрешность передачи единицы величины ИК в рабочих условиях, мА	Погрешность передачи единицы величины ИК в рабочих условиях, % от номинального значения	Расширенная неопределенность погрешности передачи единицы величины ИК в рабочих условиях, мА
Комплектная калибровка простого ИК в случае одной влияющей величины (температуры)	Известный способ	0,0037	0,04	0,0024
	Предложенный [2–5] способ	0,00041	0,004	0,00021
Комплектная калибровка простого ИК в случае двух влияющих величин (температуры и времени)	Известный способ	0,0037	0,04	0,0032
	Предложенный [2–5] способ	0,00045	0,005	0,00021
Комплектная калибровка сложного ИК в случае одной влияющей величины (температуры)	Известный способ	0,0077	0,08	0,0042
	Предложенный [2–5] способ	0,0063	0,06	0,0035
Комплектная калибровка сложного ИК в случае двух влияющих величин (температуры и времени)	Известный способ	0,0078	0,08	0,0044
	Предложенный [2–5] способ	0,0065	0,07	0,0039

Сопоставительный анализ полученных экспериментальных данных доказывает работоспособность и применимость предложенного нового способа калибровки ИК ИС в рабочих условиях в одной точке диапазона измерений [2–5]. Применение способа в каждой регламен-

тированной точке диапазона измерений ИК ИС делает возможным калибровку ИК ИС без демонтажа (если это вообще возможно), транспортировки элементов ИК ИС в калибровочную лабораторию и обратно, нового монтажа ИК ИС с возможной утратой прежнего приработанного режима, а главное, позволяет получить калибровочную кривую ИК ИС именно для представляющих практический интерес рабочих условий эксплуатации ИК ИС.

Библиографический список

1. РМГ 29-2013. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – М. : Стандарт-информ, 2014. – 55 с.
2. Данилов, А. А. Калибровка средств измерений в рабочих условиях / А. А. Данилов, М. В. Бержинская, Ю. В. Кучеренко, Н. П. Ординарцева // Метрология. – 2014. – № 1. – С. 19–22.
3. Danilov, A. A. Calibration of measuring instruments under working conditions // A. A. Danilov, Yu. V. Kucherenko, M. V. Berzhinskaya, N. P. Ordinartseva // Measurement Techniques. – 2014. – Vol. 57, iss. 3. – P. 228–230.
4. Danilov, A. A. Calibration Method of Measuring Instruments in Operating Conditions / A. A. Danilov, M. V. Berzhinskaya, Yu. V. Kucherenko, N. P. Ordinartseva // Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing X. – Singapore : World Scientific Publishing Company, 2015. – P. 149–156.
5. Danilov, A. A. Calibration method of measuring instruments in operating conditions / A. A. Danilov, Yu. V. Kucherenko, M. V. Berzhinskaya, N. P. Ordinartseva // Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing (AMCTM 2014) : trouble VNIIM, IMEKO TC21 International Conference. – St. Petersburg, Russia, 2014.
6. ГОСТ 8.395-80. ГСИ. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2008. – 7 с.
7. ГОСТ Р 54500.3.1-2011. Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008. Дополнение 1: 2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 1. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200088856>

Ординарцева Наталья Павловна

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

Ordinartseva Natalia Pavlovna

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

УДК 006.91

Ординарцева, Н. П.

Экспериментальное исследование возможности передачи в рабочих условиях единицы величины калибруемому каналу измерительной системы / Н. П. Ординарцева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 28–36. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-4.

Д. В. Артамонов, А. В. Князьков, М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов

МОНИТОРИНГ ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ПРИ РАБОТЕ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМАХ

D. V. Artamonov, A. V. Knyazkov, M. Yu. Parshukov, E. V. Sapunov, A. V. Svetlov

MONITORING OF FREQUENCY PARAMETERS OF OPERATIONAL AMPLIFIERS WHEN OPERATING IN NON-STATIONARY THERMAL MODES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Обоснована необходимость мониторинга частотных параметров операционных усилителей при работе в нестационарных тепловых режимах с целью прогнозирования времени установления рабочего режима операционных усилителей после включения питания и с целью создания их макромоделей для различных температур в пределах рабочего температурного диапазона. **Материалы и методы.** Исследование выполнено с применением разработанного измерителя частотных параметров операционных усилителей и стенда для определения градуировочных характеристик преобразователя отношения амплитуд и разности фаз сигналов. **Результаты.** Приведены структурная схема измерителя частотных параметров операционных усилителей, методика измерения частоты единичного усиления операционных усилителей, методика прогнозирования времени установления рабочего режима операционных усилителей после включения питания. **Выводы.** Подтверждена возможность применения разработанного измерителя частоты единичного усиления операционных усилителей для мониторинга их параметров при работе в нестационарных тепловых режимах.

A b s t r a c t. Background. The necessity of monitoring the frequency parameters of operational amplifiers when operating in non-stationary thermal modes is substantiated with the aim of predicting the time of setting the operation mode of operational amplifiers after power-up and with the purpose of creating their macromodels for different temperatures within the operating temperature range. **Materials and methods.** The research was carried out using the developed meter of frequency parameters of operational amplifiers and a system for determining the calibration characteristics of the converter of the ratio of the amplitudes and phase difference of the signals. **Results.** The structural diagrams of the meter of the frequency parameters of operational amplifiers, the technique of measuring the unity gain bandwidth of operational amplifiers, the method of predicting the settling time of operational amplifiers after power-up are given. **Conclusions.** The possibility of using the developed frequency meter of the unity gain bandwidth of operational amplifiers for monitoring their parameters when operating in non-stationary thermal modes has been confirmed.

К л ю ч е в ы е с л о в а: частотные параметры операционных усилителей, нестационарный тепловой режим, мониторинг, измеритель, методика.

Key words: frequency parameters of operational amplifiers, non-stationary thermal mode, monitoring, measuring instrument, technique.

Введение

При проектировании изделий электронной техники и подборе электронных компонентов для их производства необходимо учитывать изменение параметров компонентов при работе в нестационарных тепловых режимах.

Во-первых, изменение теплового режима происходит в процессе саморазогрева электронных компонентов после подачи питающих напряжений. Обоснованный выбор компонентов для схем с малым временем установления рабочего режима (схем быстрой готовности) возможен при наличии объективной информации о времени, необходимом для установления рабочего температурного режима компонента, соответствующего его долгосрочной работе.

Во-вторых, необходимо учитывать изменение параметров компонентов при работе в широком температурном диапазоне. Для учета изменения температуры окружающей среды при моделировании работы электронных схем с использованием программ схемотехнического моделирования (PSpice, OrCAD, Multisim и др.) необходимо иметь набор моделей диодов, транзисторов, пассивных компонентов, а также макромоделей интегральных операционных усилителей (ОУ), составленных для различных температур в пределах всего температурного диапазона. Это, в свою очередь, предполагает измерение параметров компонентов, помещенных в камеру тепла и холода, причем общая продолжительность таких измерений определяется суммой продолжительностей процессов установления рабочего температурного режима компонента в каждой точке температурного диапазона. Средства измерений параметров компонентов при их климатических испытаниях должны при каждой температуре фиксировать факт установления показаний в пределах погрешности, задаваемой пользователем, регистрировать установившееся показание и после этого давать разрешение на установку нового значения температуры.

В данной статье в качестве примера рассматривается мониторинг частотных параметров ОУ в процессе их саморазогрева после включения питания.

Измеритель частотных параметров ОУ

Важнейшим частотным параметром ОУ является частота единичного усиления – параметр, который в обязательном порядке приводится в паспортах на интегральные микросхемы ОУ. Кроме частоты единичного усиления, важно контролировать запас устойчивости ОУ по фазе на этой частоте, что позволяет прогнозировать склонность электронных схем на ОУ к самовозбуждению. Для мониторинга частотных параметров ОУ при работе в нестационарных тепловых режимах необходимо разработать средства измерений частоты единичного усиления ОУ, обладающие повышенной разрешающей способностью и в то же время имеющие быстроедействие, достаточное для отслеживания изменения измеряемого параметра при изменении температуры.

Этим требованиям отвечает разработанный авторами измеритель частоты единичного усиления и запаса устойчивости ОУ по фазе [1], структурная схема которого приведена на рис. 1. С целью повышения быстрогодействия осуществляется одновременное преобразование отношения амплитуд и разности фаз выходного и входного напряжений ОУ в постоянные напряжения с помощью двух широкополосных демодулирующих логарифмических усилителей, вычитающего устройства и фазового детектора перемножающего типа. Эти функции выполняются интегральной микросхемой AD8302 производства компании Analog Devices, Inc. [2].

Исследуемый ОУ включается в измерительную схему (ИС) с варьируемыми коэффициентом усиления и конфигурацией (инвертирующий или неинвертирующий усилитель). Тестовые синусоидальные сигналы с варьируемой частотой формируются программно управляемым DDS-генератором сигналов AD9850 [3]. Выходное и входное напряжения ОУ подаются на входы А и Б преобразователя отношения амплитуд и разности фаз в постоянные напряжения U_a , линейно зависящее от логарифма отношения амплитуд сигналов на выходе и входе ОУ, и U_ϕ , линейно зависящее от разности фаз этих сигналов.



Рис. 1. Структурная схема измерителя частоты единичного усиления и запаса устойчивости ОУ по фазе

Напряжения U_a и U_ϕ оцифровываются с помощью аналого-цифровых преобразователей АЦП1 и АЦП2 типа MCP3424 [4] с программной установкой разрешения (12, 14, 16 и 18 разрядов) и передаются на персональный компьютер ПК. Отношение амплитуд K_a в децибелах и фактическая разность фаз ϕ в градусах вычисляются по измеренным выходным напряжениям U_a и U_ϕ в милливольтках с использованием предварительно полученных градуировочных характеристик преобразователя AD8302. В частности, для экземпляра AD8302, использованного при макетировании измерителя, с помощью специально построенного стенда получены следующие градуировочные характеристики:

$$K_a(U_a) = \frac{U_a - 934,036}{31,405}; \quad (1)$$

$$\phi(U_\phi) = \frac{1915,8 - U_\phi}{10,969}. \quad (2)$$

Программное обеспечение измерителя составлено в среде программирования National Instruments LabVIEW [5]. Для управления аппаратной частью используются контроллер последовательной передачи данных и дешифратор команд.

Предложены методика измерения частоты единичного усиления ОУ с повышенным разрешением и алгоритм функционирования описанного измерителя [6]. В процессе поиска частоты единичного усиления ОУ при итерационном сужении диапазона поиска до получения заданного разрешения по частоте измеряются текущие значения напряжения U_a на выходе детектора AD8302 и оцениваются полученные с помощью градуировочной характеристики значения коэффициента усиления ОУ K_a – отношения амплитуд выходного и входного напряжений ОУ в децибелах. Предложено в качестве критерия остановки процесса поиска использовать уменьшение полученного значения коэффициента усиления ОУ до $|K_a| < 0,02$ дБ.

Для повышения точности частота единичного усиления ОУ f_1 находится не как среднее значение между нижней и верхней частотами диапазона поиска, а вычисляется по интерполяционной формуле

$$f_1 = f_n + \frac{K_{a,n}(f_v - f_n)}{K_{a,v} - K_{a,n}}, \quad (3)$$

где f_1 [Гц] – полученная путем интерполяции частота, принимаемая за частоту единичного усиления ОУ; f_n и f_v [Гц] – нижняя и верхняя частоты диапазона поиска частоты единичного усиления; $K_{a,n}$ и $K_{a,v}$ [дБ] – коэффициенты усиления ОУ на частотах f_n и f_v .

Исследования на примерах ОУ общего применения TL072, NJM4580, 544УД2 показали, что процесс поиска частоты единичного усиления ОУ в среднем осуществляется за 15–17 шагов итерации и занимает 1–1,5 с (без учета затрат времени на установку микросхемы в контактирующее устройство, включение питания и инициализацию оборудования). Тем самым показано, что разработанный измеритель частоты единичного усиления и запаса устойчивости ОУ по фазе обладает быстродействием, вполне достаточным для мониторинга в условиях нестационарных тепловых режимов.

Методика прогнозирования времени установления рабочего режима ОУ после включения питания

После подачи питающих напряжений в процессе саморазогрева ОУ происходит изменение их параметров, причем наибольшее влияние на характеристики электронных схем оказывает изменение частоты единичного усиления ОУ. Для прогнозирования времени, необходимого для установления рабочего температурного режима ОУ, соответствующего долгосрочной работе, предложена методика, предусматривающая следующие этапы.

1. С использованием разработанного авторами быстродействующего измерителя осуществляется мониторинг частоты единичного усиления исследуемых экземпляров ОУ в течение 30 мин от момента включения с интервалом времени 1 мин. Измерения проводятся в нормальных климатических условиях, а при необходимости – при температурах окружающей среды, задаваемых при исследованиях с помощью камеры тепла и холода.

2. Строятся графики полученных зависимостей от времени измеренных значений частоты f_1 единичного усиления ОУ. Определяется установившееся значение $f_{1\text{уст.}}$, соответствующее температурному режиму долгосрочной работы исследуемого ОУ.

В качестве примеров на рис. 2 и 3 приведены такие графики для ОУ TL072 [7] и 544УД2Б [8]. Установившиеся значения частоты $f_{1\text{уст.}}$ соответственно равны 3,553 и 9,534 МГц.

3. Определяются относительные погрешности:

$$\delta f_1 = \frac{f_1 - f_{1\text{уст.}}}{f_{1\text{уст.}}} \cdot 100 \%. \quad (4)$$

4. Строятся графики зависимостей относительных погрешностей δf_1 от времени в пределах погрешности, задаваемой пользователем (пример – на рис. 4). По полученным графикам можно определить время, необходимое для установления рабочего температурного режима ОУ, исходя из допускаемой дополнительной температурной погрешности для данного применения ОУ.

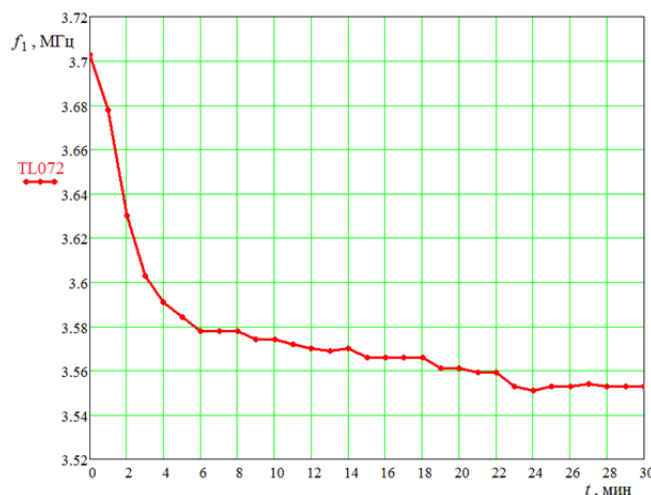


Рис. 2. График зависимости измеренных значений частоты единичного усиления ОУ TL072 от времени

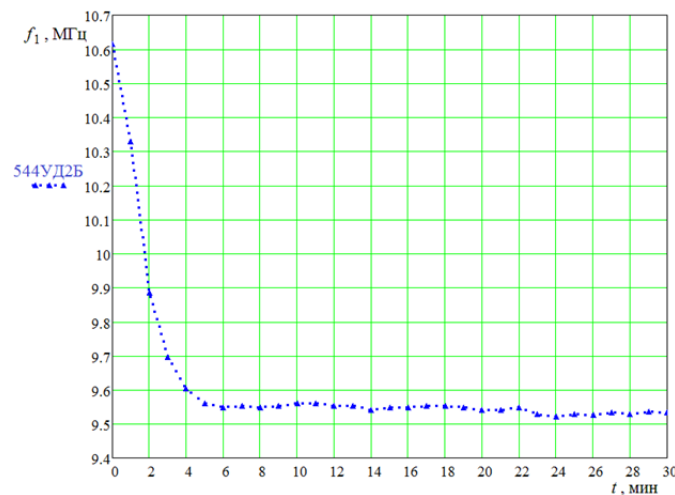


Рис. 3. График зависимости измеренных значений частоты единичного усиления ОУ 544УД2Б от времени

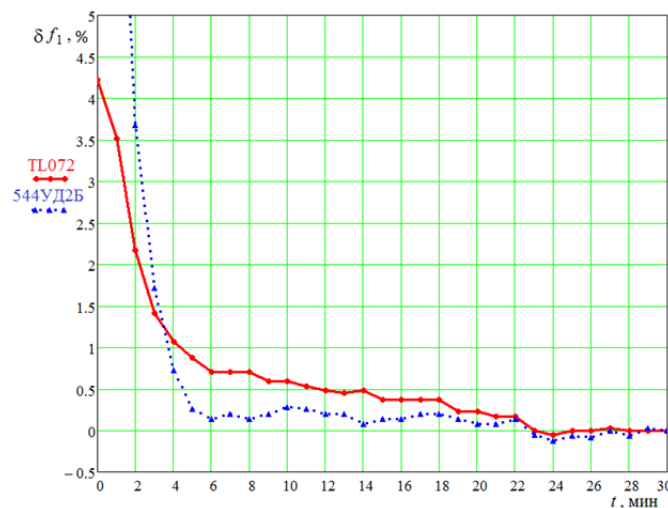


Рис. 4. Графики зависимостей относительной погрешности измерения частоты единичного усиления ОУ TL072 и 544УД2Б от времени

Из графика рис. 4 следует, что:

- минимальный прогрев в течение 2 мин сопровождается дополнительной погрешностью измерения около 2 % для ОУ TL072 и около 4 % для ОУ 544УД2Б; следовательно, при построении схем с быстрым установлением рабочего режима предпочтение следует отдать ОУ TL072;
- прогрев в течение 4–5 мин сопровождается приемлемой для большинства применений дополнительной погрешностью измерения около 1 %;
- прогрев в течение 20 мин позволяет проводить высокоточное измерение частоты единичного усиления ОУ при дополнительной погрешности 0,25 %.

Предложенная методика прогнозирования времени установления рабочего температурного режима ОУ после включения питания на основе мониторинга изменения частоты единичного усиления в процессе саморазогрева ОУ позволяет обоснованно выбирать ОУ для схем с малым временем установления рабочего режима (схем быстрой готовности).

Практическая реализация этой методики стала возможной благодаря высокому быстродействию разработанного измерителя частоты единичного усиления ОУ. При «ручной» перестройке генератора и осциллографическом измерении выходного напряжения ОУ в соответствии с рекомендациями ГОСТ [9] поминутный мониторинг реализовать было невозможно, поскольку на получение одного отсчета требовалось 3–5 мин.

Заключение

Подтверждена возможность применения разработанного измерителя частоты единичного усиления операционных усилителей для мониторинга их параметров при работе в нестационарных тепловых режимах.

Библиографический список

1. Измерение отношения амплитуд и разности фаз напряжений при определении частотных параметров операционных усилителей / А. С. Ишков, А. В. Князьков, Н. В. Родионова, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 4 (40). – С. 83–93.
2. AD8302. LF–2.7 GHz RF/IF Gain and Phase Detector. – Analog Devices, Inc., 2002. – URL: <http://www.analog.com/media/cn/technicaldocumentation/-data-sheets/AD8302.pdf>.
3. AD9850 CMOS 125 MHz Complete DDS Synthesizer. – Analog Devices, Inc., 2004. – URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9850.pdf>.
4. MCP3422/3/4. 18-Bit, Multi-Channel $\Delta\Sigma$ Analog-to-Digital Converter with I²C™ Interface and On-Board Reference. – Microchip Technology Inc., 2009. – URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22088c.pdf>.
5. Тревис, Дж. LabVIEW для всех / Дж. Тревис, Дж. Кринг. – М. : ДМК Пресс, 2015. – 904 с.
6. Сапунов, Е. В. Методика измерения частоты единичного усиления операционных усилителей с повышенным разрешением / Е. В. Сапунов, А. В. Светлов // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2016» (г. Пенза, 25–27 октября 2016 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – С. 95–99.
7. TL07xx Low-Noise JFET-Input Operational Amplifiers. – Texas Instruments, Inc., 2015. – URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl072.pdf>.
8. 544УД2А, 544УД2Б. Широкополосный быстродействующий операционный усилитель с полевыми транзисторами на входе. – ФГУП «НПП «Восток», 2012. – URL: <http://www.vostok.nsk.su/files/pdf/544UD2.pdf>.
9. ГОСТ 23089.13-86. Микросхемы интегральные. Методы измерения частоты среза и частоты единичного усиления операционных усилителей.

Артамонов Дмитрий Владимирович

доктор технических наук,
первый проректор,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Artamonov Dmitry Vladimirovich

doctor of technical sciences,
first vice-rector,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Князьков Александр Владимирович

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

Knyazkov Aleksandr Vladimirovich

engineer,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Паршуков Максим Юрьевич

кандидат технических наук, инженер,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Parshukov Maksim Yur'evich

candidate of technical sciences, engineer,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сапунов Евгений Владимирович

инженер,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu.ru

Sapunov Evgeniy Vladimirovich

engineer,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Светлов Анатолий Вильевич

доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой радиотехники

и радиоэлектронных систем,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu.ru

Svetlov Anatoliy Vil'evich

doctor of engineering sciences, professor,

head of sub-department of radio engineering

and radio electronic systems,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317.3

Мониторинг частотных параметров операционных усилителей при работе в нестационарных тепловых режимах/ Д. В. Артамонов, А. В. Князьков, М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 37–43. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-5.

Р. Н. Абдулов, Н. А. Абдуллаев, Х. Г. Асадов

ТЕОРИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИЗМЕНЧИВЫХ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЯХ

R. N. Abdulov, N. A. Abdullaev, Kh. G. Asadov

THEORY OF DETECTION OF HIGH-SPEED POINT TYPE OBJECTS UPON CHANGING ATMOSPHERIC CONDITIONS

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является система обнаружения высокоскоростных точечных объектов при изменчивых атмосферных условиях. Предметом исследования является оптимизация обнаружения высокоскоростных точечных объектов при изменчивых атмосферных условиях. Целью исследований является оптимизация всего цикла обнаружения и идентификации высокоскоростных точечных нагретых объектов. *Материалы и методы.* Сформулирована и решена математическая задача оптимизации, смысл которой заключается в достижении максимально возможной величины усредненного сигнала принимаемого от объекта ИК обнаружителем при принятой модели изменения оптической толщины атмосферы. *Результаты.* На основании решения сформулированной оптимизационной задачи с применением теории вариационного исчисления сделан вывод о возможности реализации более безопасного режима обнаружения и идентификации объекта при выявленной благоприятной атмосферной обстановке. *Выводы.* Основной вывод проведенных исследований заключается в выяснении дополнительной возможности организации более безопасного обнаружения и идентификации высокоскоростного нагретого объекта за счет введения адаптивного режима всего цикла идентификации объекта.

A b s t r a c t. *Background.* The object of researches is the system for detection of high-speed point-type objects upon changing atmospheric conditions. The subject of researches is the optimization of detection of high-speed point type objects in changing atmospheric conditions. The aim of researches is optimization of whole cycle of detection and identification of high-speed point type heated objects. *Materials and methods.* The mathematical task of optimization that is reaching the maximum value of averaged value of signal received from the object by infrared detector upon accepted model of variation of atmospheric optical depth is formulated and solved. *Results.* On the basis of solution of formulated optimization task using the variation calculation theory the resolution on feasibility of realization of more safety regime for detection and identification of object upon revealed auspicious atmospheric condition is drawn. *Conclusions.* The concluded major outcome of held researches is that the additional possibility for organization of more safety detection and identification of high-speed heated is found due to realization of adaptive regime of object identification.

К л ю ч е в ы е с л о в а: оптимизация, обнаружение, идентификация, инфракрасное излучение, атмосфера, оптическая толщина.

К e y w o r d s: optimization, detection, identification, infrared radiation, atmosphere, optical depth.

Вопросам оптимизации обнаружения и сопровождения высокоскоростных точечных объектов различного назначения в настоящее время уделяется значительное внимание (см. напр. [1–7]). При этом в литературе уделяется внимание в основном частным вопросам обнаружения и сопровождения таких объектов. Так, например, в работе [1] рассмотрены вопросы синтеза оптимального фильтра для достоверного обнаружения нагретых малоразмерных летательных объектов, а в работе [2] того же автора исследуется влияние фона на достоверность их обнаружения.

В работе [3] на основе анализа процессов пассивного обнаружения нагретых движущихся малоразмерных объектов в инфракрасном (ИК) диапазоне показано, что обнаружение нагретых точечных объектов целесообразно проводить в спектральном диапазоне 8–14 мкм, и с этой целью могут быть применены тепловизоры с неохлаждаемыми фотоприемными устройствами. В работе [4] рассмотрены вопросы создания математической модели процесса формирования инфракрасного излучения объекта в условиях естественного фоновое излучения. Показано, что соответствующая модель должна учитывать комплексный характер ИК излучения объекта, обусловленного собственным и отраженным излучением. При этом такая модель также должна учитывать особенности спектральных оптических характеристик поверхности объекта на суммарное эффективное излучение. В работе [5] проанализированы вопросы влияния пропускания атмосферы на достоверность пеленгации высокоскоростных летательных объектов в оптическом диапазоне спектра. Сообщается о разработке инвариантной по отношению к дальности видимости модели оценки коэффициента пропускания атмосферы при мониторинге объектов. В работе [6] убедительно показано, что ИК диапазон 8–14 мкм является не абсолютно прозрачным из-за наличия достаточно сильных поглощений различных малых газов на краях указанного диапазона. В работе [7] изложена предлагаемая методика расчета радиационного контраста наземных объектов в ИК диапазоне. Показано, что применение мер теплоизоляции позволяет существенно уменьшить радиационный контраст в диапазонах 3–5 и 8–14 мкм.

Вместе с тем существующие результаты детального анализа различных аспектов обнаружения и сопровождения малоразмерных нагретых летательных объектов должны быть дополнены общей теорией оптимизации процесса обнаружения таких объектов и их сопровождения в условиях нестабильности атмосферного воздействия. В настоящей статье будут проанализированы вопросы оптимизации обнаружения в условиях нестабильной атмосферы и сопровождения нагретых летательных точечных объектов в пределах заданного геометрического промежутка, размещенного между удаленным объектом и обнаружителем.

Общая схема обнаружения высокоскоростного малоразмерного нагретого объекта с помощью ИК камеры показана на рис. 1. Задача обнаружения объекта ставится следующим образом. Задается интервал A_1A_2 , где должна быть определена траектория полета объекта и выполнено его распознавание. Точка A_1 является левой предельной точкой, где процесс обнаружения должен быть завершен и дальнейший полет объекта в направлении обнаружителя нежелателен.

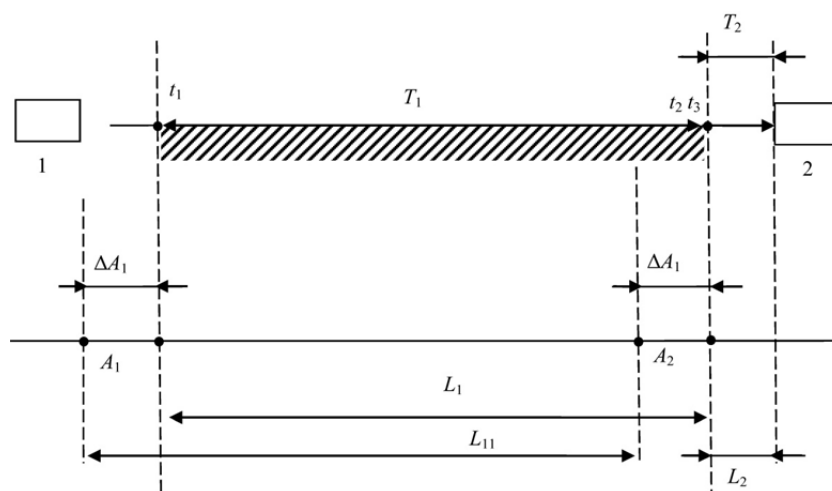


Рис. 1. Общая схема обнаружения и сопровождения нагретого точечного летательного объекта с помощью ИК камеры. Цифрами обозначены: 1 – точечный нагретый летательный объект; 2 – ИК обнаружитель. Буквенные обозначения: A_1 – предельная точка завершения обнаружения; A_2 – предельная точка завершения идентификации объекта

Рассматривается случай нестабильной атмосферы, где оптическая толщина в течение интервала $t_2 - t_1$ на исследуемой дистанции может как увеличиться, так и уменьшиться.

Очевидно, что с позиции обнаруживающей стороны целесообразно сместить точки A_1 и A_2 влево на равные шаги ΔA_1 , чтобы гарантированно обезопасить себя от летательного объекта.

Рассмотрим базовые положения предлагаемой методики оптимизации.

Геометрический показатель L_1 определяется как

$$L_1 = V_{ob} T_1 = V_{ob} (t_2 - t_1). \quad (1)$$

Принимаем, что удельная оптическая толщина атмосферы в интервале $T_1 = t_2 - t_1$ изменяется равновероятным образом по следующим выражениям (рис. 2):

$$\tau(t) = \tau_{\max} - kt, \quad (2)$$

$$\tau(t) = \tau_{\min} + kt, \quad (3)$$

где

$$t_1 \leq t \leq t_2. \quad (4)$$

При этом

$$\int_0^{T_1} \tau(t) dt = C_1, \quad (5)$$

где

$$C_1 = \text{const}. \quad (6)$$

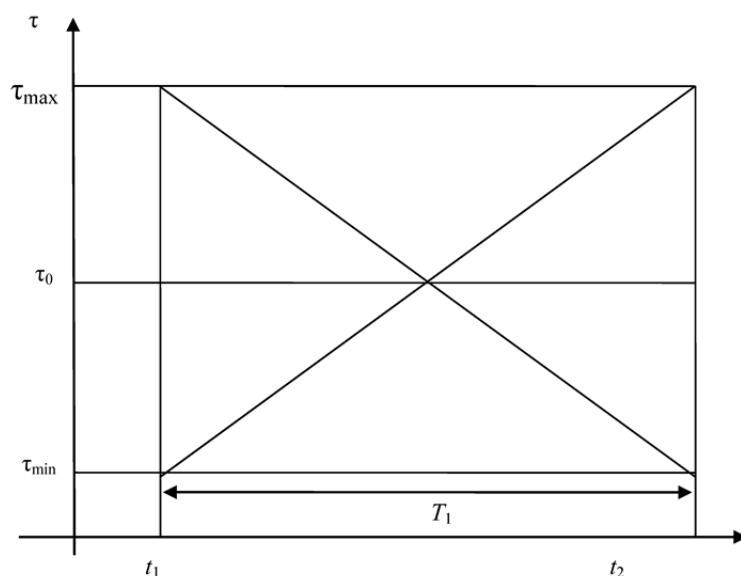


Рис. 2. Графики функций (2) и (3)

Согласно закону Бугера – Бера, а также закону обратных квадратов расстояния от точечного источника до приемника [8] при нахождении объекта на интервале T_1 имеем

$$I_{\text{вх}}(t, A_1) = \frac{I_0 e^{-V_{ob} \tau(t)}}{V_{ob} (T_1 - t)^2}, \quad (7)$$

где

$$t_2 - t_1 = T_1. \quad (8)$$

Среднее значение $I_{\text{вх}}$ в интервале t_2-t_1 вычислим как

$$I_{\text{вх.ср.}} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} \frac{I_0}{V_{ob}(T_1-t)^2} e^{-V_{ob}(T_1-t)\tau(t)} dt. \quad (9)$$

С учетом выражений (5) и (9) можем составить полный функционал безусловной вариационной оптимизации

$$F = \int_0^{T_1} F_1(T_1, t_1, t_2, V_{ob}, \tau(t)) dt = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} \frac{I_0 e^{-V_{ob}(T_1-t)\tau(t)}}{V_{ob}(T_1-t)^2} dt + \lambda \int_0^{T_1} \tau(t) dt. \quad (10)$$

Смысл проводимой оптимизации заключается в нахождении такой функции $\tau(t)$, при которой F достиг бы экстремального значения. Согласно уравнению Эйлера [9, 10] оптимальная функция $\tau(t)_{opt}$ должна удовлетворить условия

$$\frac{dF_1(T_1, t_1, t_2, V_{ob}, \tau(t))}{d\tau(t)} = -\frac{I_0 e^{-V_{ob}t\tau(t)}}{T_1[V_{ob}(T_1-t)]} + \lambda = 0. \quad (11)$$

Из выражения (11) получим

$$e^{-V_{ob}t\tau(t)} = \frac{\lambda T_1[V_{ob}(T_1-t)]}{I_0}. \quad (12)$$

Логарифмируя выражение (12), получим

$$\tau(t) = \frac{1}{V_{ob}(T_1-t)} \ln \frac{I_0}{\lambda T_1[V_{ob}(T_1-t)]}. \quad (13)$$

С учетом (5) и (13) имеем

$$\int_0^{T_1} \frac{1}{V_{ob}(T_1-t)} \ln \frac{I_0}{\lambda T_1[V_{ob}(T_1-t)]} dt = C_1. \quad (14)$$

Выражение (14) позволяет вычислить величину множителя Лагранжа. Опустив математические подробности вычисления этой постоянной величины и обозначив ее как λ_0 , выражение (13) запишем как

$$\tau(t) = \frac{1}{V_{ob}(T_1-t)} \ln \frac{I_0}{\lambda_0 T_1[V_{ob}(T_1-t)]}. \quad (15)$$

Таким образом, при условии (15) функционал (10), обозначающий среднюю величину усредненного сигнала получаемого от объекта, при нахождении его в интервале t_1-t_2 достигает экстремального значения. Для проверки типа экстремума достаточно вычислить вторую производную интегранта в (10) и убедиться, что она всегда положительна.

Следовательно, функционал (10) при условии (13) достигает минимальной величины. Отсюда можно сделать логический вывод о том, что для увеличения средней величины функционала (10) необходимо обеспечить обратно пропорциональную зависимость между τ и t , т.е. модель (2) более благоприятна в рассматриваемых целях. Некоторый прирост величины $I_{\text{вх.ср.}}$, получаемый при этом, можно интерпретировать как возможность некоторого смещения всего интервала T_1 влево, как это условно показано на рис. 1, на величину ΔA_1 .

Таким образом, показано, что оптимизация процесса обнаружения малоразмерных высокоскоростных нагретых объектов позволяет несколько повысить безопасность всего цикла их обнаружения и идентификации в случае наличия благоприятных атмосферных условий.

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования:

1) сформирована общая задача оптимизации всего цикла обнаружения и идентификации высокоскоростных точечных нагретых объектов;

2) сформулирована и решена математическая задача оптимизации, смысл которой заключается в достижении максимально возможной величины усредненного сигнала, принима-

емого от объекта ИК обнаружителем при принятой модели изменения оптической толщины атмосферы;

3) на основании решения сформулированной оптимизационной задачи сделан вывод о возможности реализации более безопасного режима обнаружения идентификации объекта при выявленной благоприятной атмосферной обстановке.

Библиографический список

1. Kim, S. Double layered background removal filter for detecting small infrared targets in heterogeneous backgrounds/ S. Kim // Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. – 2011. – Vol. 32, № 1. – P. 79–101.
2. Kim, S. Analysis of Infrared Signature Variation and Robust Filter Based Supersonic Target Detection. Research Article. Hindawi Publishing Corporation / S.Kim, S. G. Sun, K. T. Kim // The Scientific World Journal. – 2014. – ID 140930. – 17 p. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3942398/pdf/TSWJ2014-140930.pdf>
3. Головкин, В. А. Обнаружение нагретых движущихся малоразмерных объектов в ИК диапазоне / В. А. Головкин, В. Н. Емельянов, С. В. Солк // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2013. – Т. 56, № 5. – С. 40–44.
4. Кучерин, Р. Н. Математическая модель формирования инфракрасного излучения объекта в условиях естественного фонового излучения / Р. Н. Кучерин, В. И. Лопин, А. В. Лопин, О. Ю. Макаров. – <https://cyberleninka.ru/article/n/matematiceskaya-model-formirovaniya-infrakrasnogo-izlucheniya-obekta-v-usloviyah-estestvennogo-fonovogo-oblucheniya>
5. Демин, А. В. Инвариантная модель для оценки коэффициента пропускания атмосферы при мониторинге объектов в оптическом диапазоне спектра / А. В. Демин, М. И. Моисеева // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 1 (77). – С. 10–15.
6. Пропускание излучения атмосферой – Системы тепловидения. – URL: <http://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/sistemy-teplovideniya-7.html>
7. Афанасьева, Е. М. Аналитическая методика и результаты расчета радиационного контраста наземных объектов в инфракрасном диапазоне длин волн / Е. М. Афанасьева, В. Г. Кечков. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskaya-metodika-i-rezultaty-rascheta-radiatsionnogo-kontrasta-nazemnyh-obektov-v-infrakrasnom-diapazone-dlin-voln>
8. Мирошников, М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов / М. М. Мирошников. – Л. : Машиностроение, 1983. – 696 с.
9. Эльсгольц, Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л. Э. Эльсгольц. – М. : Наука, 1974. – 432 с.
10. Васильев, Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач / Ф. П. Васильев. – М. : Наука, 1988. – 552 с.

Абдулов Рауф Нусрат оглы

кандидат технических наук,
заместитель главного инженера,
НИИ Министерства обороны промышленности
Азербайджанской Республики
(Азербайджанская Республика,
г. Баку, ул. Рахиба Мамедова, 9)
E-mail: rauf.abdulov@yandex.ru

Abdulov Rauf Nusrat oglu

candidate of technical sciences,
deputy chief engineer,
Research Institute of Ministry of Defense Industry
of Azerbaijan Republic
(9 Rahib Mammadov street, Baku,
Republic of Azerbaijan)

Абдуллаев Новруз Алмамед оглы

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
НИИ Министерства обороны промышленности
Азербайджанской Республики
(Азербайджанская Республика,
г. Баку, ул. Рахиба Мамедова, 9)
E-mail: nabdullayev@mail.ru

Abdullaev Novruz Almamed ogly

candidate of technical sciences,
senior researcher,
Research Institute of Ministry of Defense Industry
of Azerbaijan Republic
(9 Rahib Mammadov street, Baku,
Republic of Azerbaijan)

Асадов Хикмет Гамид оглы

доктор технических наук, профессор,
НИИ Аэрокосмической информатики
Национального аэрокосмического агентства
(Азербайджанская Республика,
г. Баку, ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: asadzade@rambler.ru

Asadov Khikmet Gamid ogly

doctor of technical sciences, professor,
Research Institute of Aerospace Informatics
of National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundov street, Baku,
Republic of Azerbaijan)

УДК 623.55.022; 681.7.015.2; 681.7.067

Абдулов, Р. Н.

Теория обнаружения высокоскоростных точечных объектов при изменчивых атмосферных условиях/ Р. Н. Абдулов, Н. А. Абдуллаев, Х. Г. Асадов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 44–49. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-6.

В. Е. Пауткин, С. В. Прилуцкая

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ СТОП-ТРАВЛЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

V. E. Pautkin, S. V. Prilutskaya

GEOMETRICAL STOP-ETCHING IN MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS TECHNOLOGY

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассмотрены технологические особенности формирования кремниевых структур микромеханических датчиков методом анизотропного «стоп-травления» кремния. Целью работы является анализ основных возможностей получения структур методами анизотропного травления, основанными на «самоостановке» процесса травления. **Материалы и методы.** Используются положения кристаллографии, основанные на различии скоростей травления кремния по разным кристаллографическим направлениям. **Результаты.** Показана возможность формирования кремниевых структур с X-образным сечением только методом анизотропного травления. **Выводы.** Использование предложенного метода позволяет повысить технологичность изготовления микромеханических датчиков.

A b s t r a c t. Background. Technological features of the formation of silicon structures of micromechanical sensors by the method of anisotropic «stop-etching» of silicon are considered. The aim of the paper is to analyze the basic possibilities of obtaining structures by anisotropic etching methods based on the «self-stopping» of the etching process. **Materials and methods.** The crystallographic positions are used, based on the difference in the etching rates of silicon in different crystallographic directions. **Results.** The possibility of forming silicon structures with an X-shaped cross-section is shown only by the method of anisotropic etching. **Conclusions.** The use of the proposed method makes it possible to increase the manufacturability of manufacturing micromechanical sensors.

К л ю ч е в ы е с л о в а: анизотропное травление, микроэлектромеханические системы, V-канавки, кристаллографическая плоскость, стоп-травление, защитный слой.

Key words: anisotropic etching, microelectromechanical systems, V-grooves, crystallographic plane, stop-etching, protective layer.

В настоящее время технологии микроэлектромеханических систем, или МЭМС, находят широкое применение при разработке датчиков физических величин, таких как датчики давления, акселерометры, датчики угловой скорости. Кремниевая микромеханика позволяет вывести датчиково-преобразующую аппаратуру на новый уровень за счет снижения габаритно-массовых показателей и энергопотребления с сохранением заданных функций. Данное обстоятельство особенно актуально при разработке ДПА для критических применений, таких как системы инерциальной навигации, системы ориентации объекта в пространстве [1, 2].

Кремниевая микромеханика, используя хорошо отработанные в производстве технологии интегральных микросхем, такие как окисление кремниевых пластин, осаждение и травление тонких пленок и другое, в то же время базируется на специально разработанных технологических процессах объемной микрообработки кремния, в частности технологии глубинного

анизотропного травления. Преимущества анизотропного травления при формировании МЭМС заключаются в возможности формирования кремниевых структур строго заданной конфигурации, в том числе с вертикальными стенками, используя в качестве защитной пленки при травлении слой термически выращенного оксида кремния на поверхности пластин. Другим преимуществом технологии является доступность метода, не требующего сложного технологического оборудования и применяемых химических реактивов.

Анизотропное травление позволяет формировать в кремниевых пластинах сквозные отверстия, получать вертикальный профиль структур, создавать упругие подвесы и мембраны датчиков заданной толщины. Наряду с этим метод анизотропного травления позволяет изготавливать структуры, формирование которых из-за кристаллографического строения кремния будет «самоостанавливающимся» процессом.

В технологиях МЭМС широко применяют два типа «самоостанавливающихся», или «самотормозящихся», процесса анизотропного травления кремния.

К первому типу относятся технологии остановки травления на слоях кремния, отличных по своим электрофизическим параметрам от основной кремниевой подложки, например, остановка травления на p^{++} – слоях, сформированных методом диффузии примеси. Основную массу подложки удаляют травлением в растворе гидроксида калия КОН с последующим дотравливанием в растворе этилендиамина [3, 4].

Разновидностью данной технологии является технология электрохимического стоп-травления. Данная технология основана на процессах анодной пассивации при травлении кремния с обратным смещенным p - n -переходом, при этом остановка травления кремния достигается при подаче положительного потенциала на тонкий эпитаксиальный слой кремния n -типа посредством омического электрического контакта, в то время как электрический контакт к травящей подложке кремния p -типа осуществляется через травильный раствор с инертным электродом [5].

Ко второму типу «самотормозящихся» процессов относят анизотропное травление, останавливающееся из-за особенностей кристаллографического строения кремния и совокупности таких технологических факторов, как кристаллографическая ориентация кремниевой подложки, кристаллографическая ориентация маски травления, ширина маски травления, а также тип используемого травителя.

Известно, что при ориентации кремниевой пластины (100) и ориентации стороны маски травления вдоль кристаллографических направлений [110] при травлении в водном растворе КОН профиль травления будет иметь вид, изображенный на рис. 1.

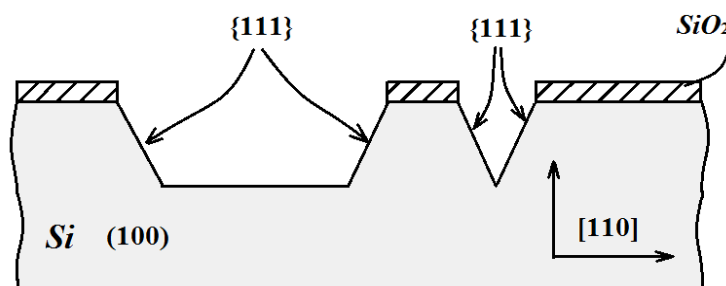


Рис. 1. Профиль травления кремниевой пластины

Как видно из рис. 1, при смыкании кристаллографических плоскостей (111) травление останавливается (на самом деле плоскости (111) также продолжают травиться в горизонтальном направлении, но скорость их травления в сотни раз меньше скоростей травления плоскостей (100) и (110), поэтому этим обстоятельством на практике пренебрегают). Таким образом, варьируя шириной маски травления, можно получать точно заданный профиль травления, вплоть до самоостановки процесса при смыкании плоскостей (111). В литературных источниках это получило название «геометрическое стоп-травление» [6, 7].

Аналогом данного процесса в технологии интегральных микросхем можно считать технологию «полипланар» – вертикальное анизотропное травление с заполнением канавок поликристаллическим кремнием [8].

Технологии геометрического стоп-травления могут быть применены при создании различных структур МЭМС-датчиков, таких как конструктивные элементы датчиков давления [9] или упругие элементы МЭМС-акселерометров [10].

В обоих случаях анизотропно травят кремний до получения V -канавки и либо прекращают процесс формирования элементов [9], либо формирование V -канавки является промежуточным этапом формирования необходимых структур [10].

На технологии «геометрического стоп-травления» основано формирование кремниевых структур, аналогичных изображенным на рис. 2. Данные структуры могут быть реализованы в конструкциях кремниевых чувствительных элементов микромеханических датчиков угловой скорости.

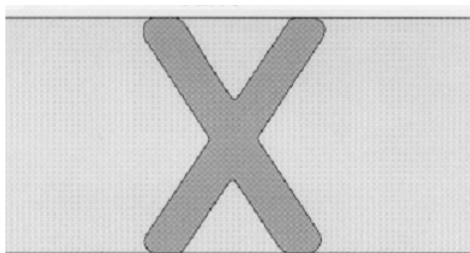


Рис. 2. Торсион микромеханического датчика угловой скорости

Представленная структура может быть выполнена последовательным применением различных видов травления, например плазмохимического и анизотропного. При плазмохимическом травлении протравливаются вертикальные стенки (канавки) микромеханической структуры, при анизотропном травлении формируются крестообразные сечения в соответствии с ориентацией кристаллографических плоскостей монокристаллической пластины кремния [11].

Представленный выше способ изготовления характеризуется необходимостью применения сложного технологического оборудования, такого, как установок плазмохимического травления кремния с возможностью создания вертикального профиля травления. Кроме того, после операций плазмохимического травления на поверхности пластин остаются значительные загрязнения, что требует тщательной очистки кремниевых пластин [12]. Это ограничивает технологичность способа.

В целях сокращения номенклатуры используемого технологического оборудования разработан способ изготовления указанных структур крестообразного сечения [13]. Данный способ включает формирование механической структуры с крестообразными торсионами из пластины монокристаллического кремния только методом анизотропного травления, которое проводят в два этапа. На первом этапе формируют промежуточную фигуру торсиона в форме выпуклого шестиугольника травлением кремния в плоскости $\{110\}$ с предварительным формированием первого защитного слоя с двух сторон пластины с фотолитографическим рисунком, симметричным с двух сторон пластины. Формируют второй защитный слой с двух сторон пластины с фотолитографическим рисунком, также симметричным с двух сторон пластины. Вторым анизотропным травлением формируют крестообразную форму торсиона путем травления кремния в плоскостях $\{110\}$ и $\{100\}$ до плоскостей $\{111\}$ (рис. 3).

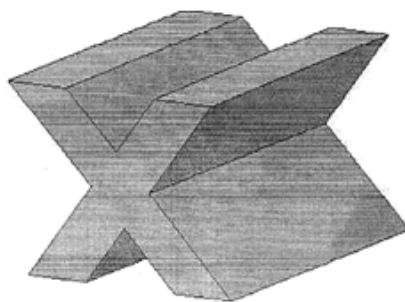


Рис. 3. Внешний вид микромеханической структуры

Укрупненный маршрут изготовления можно описать следующим образом. Исходную пластину кремния ориентации (100) подвергают термическому окислению до получения толщины окисной пленки, необходимой для защиты структур при глубинном анизотропном травлении.

Далее методом фотолитографии формируют рисунок первого защитного слоя крестообразного торсиона X -образного сечения на обеих сторонах кремниевой пластины, травят окисел кремния на открытых участках окисла, проводят химическую обработку кремниевых пластин и повторно окисляют кремниевую пластину.

Затем методом фотолитографии формируют рисунок второго защитного слоя торсиона на обеих сторонах кремниевой пластины, травят окисел кремния на открытых участках кремниевой пластины, проводят химическую обработку кремниевых пластин.

После формирования первого и второго защитного слоев торсиона проводят операцию анизотропного травления кремния до получения промежуточной фигуры травления. Анизотропное травление проводят в растворе гидроксида калия КОН, поддерживая температуру травителя в пределах 96–98 °С. Известны характеристики анизотропного травления кремния ориентации (100): скорости травления плоскостей $\{100\}$, $\{110\}$, $\{111\}$, а также слоев термического оксида кремния.

Следующей операцией является травление второго защитного слоя кремния в буферном травителе в областях формирования V -области торсиона с планарной и непланарной стороны кремниевой пластины, при этом из-за разной толщины первого и второго защитного слоя окисла на плечах торсиона остается слой окисла толщиной h_{SiO_2} , необходимый для формирования конечной фигуры торсиона. Далее проводят травление промежуточной фигуры. При этом при анизотропном травлении кремния в V -области торсиона с планарной и непланарной сторон пластины происходит самоограничение травления на плоскостях $\{111\}$, что приводит к остановке травления. В результате предложенного решения происходит формирование крестообразного торсиона исключительно методом анизотропного травления кремния (рис. 4).

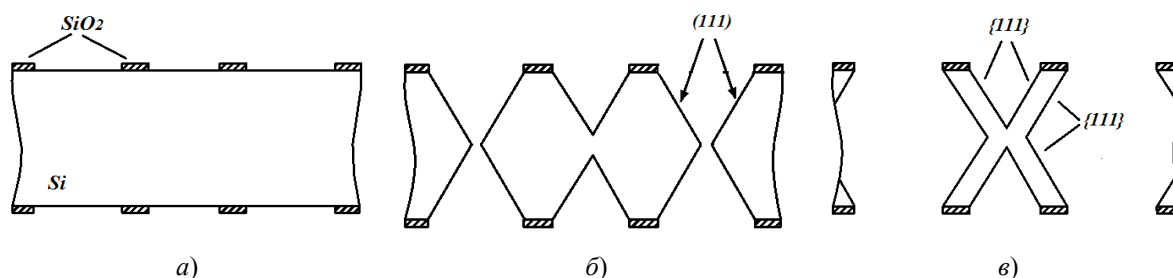


Рис. 4. Схема процесса травления: а – исходная кремниевая пластина; б – промежуточная фигура травления; в – окончательная фигура травления

Предложенный способ обеспечивает изготовление микромеханических X -структур только методом анизотропного травления, что сокращает номенклатуру используемого технологического оборудования, сокращает производственный цикл изготовления и делает способ более технологичным по сравнению с известными.

Библиографический список

1. Дмитриенко, А. Г. Об исследовании возможности создания инерциальных модулей на основе отечественных технологий объемной микромеханики / А. Г. Дмитриенко, А. А. Папко, С. И. Торгашин, И. В. Кирянина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 3 (5). – С. 45–53.
2. Распопов, В. Я. Система ориентации на микромеханических акселерометрах / В. Я. Распопов, Д. М. Малютин, Ю. В. Иванов, Д. Г. Грязин // Нано- и микросистемная техника. – 2014. – № 9. – С. 52–56.
3. Готра, З. Ю. Технология микроэлектронных устройств : справочник / З. Ю. Готра. – М. : Радио и связь, 1991. – 528 с.
4. Пат. № 2284613 Российская Федерация, МПК H01L29/84, G01L9/04. Полупроводниковый преобразователь давления и способ его изготовления / Баринов И. Н., Козин С. А. ; опубл. 27.09.2006, Бюл. № 27.

5. Иващенко, Е. И. Метод размерного стоп-травления кремния в производстве изделий микромеханики / Е. И. Иващенко, Ю. Б. Цветков // Микросистемная техника. – 2000. – № 2. – С. 16–20.
6. Kenneth, E. Bean. Anisotropic Etching of Silicon / E. Bean. Kenneth // IEEE Transactions On Electron Devices. – 1978. – Vol. Ed-25, № 10. – P.1185–1193.
7. Fabrication of a vertical side wall using double-sided anisotropic etching of (100) oriented silicon / Hyun-Seok Kim, Jung-Mu Kim, Yong-Seung Bang, Eun-Seok Song, Chang-Hyeon Jiand, Yong-Kweon Kim // J. Micromech. Microeng. – 2012. – Vol. 22. – 11 p. DOI: 10.1088/0960-1317/22/9/095014.
8. Коледов, Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок : учебник для вузов / Л. А. Коледов. – М. : Радио и связь, 1989. – 400 с.
9. Чернов, А. С. Исследование закономерностей формирования 3D островковых структур Si (100) при травлении в водном растворе КОН / А. С. Чернов, М. А. Чебанов, В. А. Гридчин, В. Ю. Васильев // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 9. – С. 34–40.
10. Былинкин, С. Ф. Интегральные МЭМС-датчики с повышенной стабильностью выходных параметров / С. Ф. Былинкин, А. А. Гаврилов, А. Н. Шипунов // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 8. – С. 36–41.
11. Пат. № 2 248 525 Российская Федерация, G01C 19/56 G01P 9/04. Микромеханический вибрационный гироскоп и способ его изготовления / Рубчиц В. Г., Калугин В. В., Лапенко В. Н., Шилов В. Ф., Плеханов В. Е., Тихонов В. А., Зотов С. А., Тимошенков С. П., Максимов В. Н. ; опублик. 20.03.2005; Бюл. № 8.
12. Галперин, В. А. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях / В. А. Галперин, Е. В. Данилкин, А. И. Мочалов. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2013. – 283 с.
13. Пат. № 2 485 620 Российская Федерация, МПК H01L21/302, G01C 19/22. Способ изготовления микромеханического вибрационного гироскопа / Пауткин В. Е., Мишанин А. Е., Шепталинина С. В., Николаев А. А. ; опублик. 20.06.2013; Бюл. № 17.

Пауткин Валерий Евгеньевич

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

Pautkin Valeriy Evgen'evich

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

Прилуцкая Светлана Владиславовна

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

Prilutskaya Svetlana Vladislavovna

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

УДК 681.2.084

Пауткин, В. Е.

Геометрическое стоп-травление в технологии микроэлектромеханических систем / В. Е. Пауткин, С. В. Прилуцкая // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 50–54. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-7.

Х. Г. Асадов, К. Х. Исмаилов, Ш. Н. Джахидзаде

**МЕТОД ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОИЗВОДНЫХ
СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
В АНАЛИЗЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

Kh. G. Asadov, K. Kh. Ismailov, Sh. N. Djahidzadeh

**THE METHOD OF INTEGRAL TRANSFORMATION
FOR UTILIZATION OF DERIVATIVE SPECTRAL
CHARACTERISTICS IN ANALYSIS OF HYPERSPECTRAL DATA**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* При анализе гиперспектральных данных вопрос о выборе интервала длин волн обычно решается с применением как обучаемых, так и необучаемых методов анализа. Часто используются метод энтропии и метод производных. При этом спектральные производные характеризуют форму спектра и поэтому могут быть использованы для выявления как спектральных свойств и деталей, так и для устранения шумовых сигналов. В целом производные спектральные характеристики менее чувствительны к изменению освещенности зондируемого объекта и могут быть использованы для усиления абсорбционных показателей отражательного спектра. *Материалы и методы.* Предложен информационный интегральный критерий, который может быть применен в целях анализа гиперспектральных данных. *Результаты.* Предлагаемый метод обработки гиперспектральных данных с помощью производных первого порядка позволяет вычислять оптимальный вид спектральной характеристики по заданному виду функции представления первой производной и, наоборот, по критерию экстремальной величины информационного контента гиперспектральных данных, вычислить спектральную характеристику скорректированную путем суммирования к гиперспектральной характеристике производной первого порядка. *Выводы.* Проведенный анализ показывает наличие возможности оптимизации обработки гиперспектральных данных, используя предложенный метод интегрального преобразования.

A b s t r a c t. *Background.* In analysis of hyperspectral data the question on choice of wavelength interval is usually solved using both the supervised and non-supervised methods of analysis. The entropy and derivative methods are used frequently. The spectral derivatives characterized the form of spectrum and can be used for detection of both the spectral features and details and for removal of noise signals. At whole, the derivative spectral characteristics are less sensitive for changes of illumination of sensed object and can be used for enhancement of absorption parameters of reflection spectrum. *Materials and methods.* The information integral criterion is suggested which can be used for analysis of hyperspectral data. *Results.* The suggested method of processing of hyperspectral data by help of first derivative make it possible to calculate the optimum spectral characteristic on the basis of given type of function of submission of first derivative signal and vise-versa on criterion of extremum of information content of hyperspectral data corrected by adding the first derivative of spectral characteristic. *Conclu-*

sions. The carried out analysis shows presence of possibility for optimization of processing of hyperspectral data using the suggested method of integral transformation.

К л ю ч е в ы е с л о в а: спектральная характеристика, гиперспектральные данные, производная характеристика, интегральное преобразование, спектр.

Key words: spectral characteristic, hyperspectral data, integrasl transformation, spectrum.

Хорошо известно, что вопрос о выборе интервала длин волн в анализе гиперспектральных данных может быть решен с применением как обучаемых, так и необучаемых методов анализа. Наиболее часто используемыми необучаемыми методами являются метод энтропии и метод производных [1–6].

Согласно работе [1] спектральные производные характеризуют форму спектра и поэтому могут быть использованы для выявления спектральных свойств и деталей. Производная первого порядка спектра $L(\lambda)$ определяется как

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} \approx \frac{L(\lambda_j) - L(\lambda_i)}{\Delta \lambda},$$

где $\Delta \lambda = \lambda_j - \lambda_i$; $\lambda_j > \lambda_i$.

Вторая производная определяется как

$$\frac{\partial^2 L}{\partial \lambda^2} \approx \frac{L(\lambda_k) - 2L(\lambda_j) + L(\lambda_i)}{\Delta \lambda^2},$$

где $\Delta \lambda = \lambda_k - \lambda_j$; $\lambda_k > \lambda_j > \lambda_i$.

Согласно работам [2–8] основными преимуществами производного метода анализа гиперспектральных данных являются следующие:

- 1) производные спектральные характеристики наименее чувствительны к изменению освещенности зондируемого объекта;
- 2) использование методов производной спектроскопии может усилить абсорбционные показатели отражательного спектра;
- 3) методы производной спектроскопии пригодны как для качественного, так и количественного анализа.

Вместе с тем применение производных методов анализа при обработке гиперспектральных данных связано со следующими проблемами:

- 1) гиперспектральные исходные данные обычно насыщены как шумовыми составляющими, так и специфическими спектральными элементами, различение которых друг от друга весьма затруднительно;
- 2) отсутствует целесообразный информационный критерий различия указанных шумовых и спектральных составляющих;
- 3) отсутствует математический аппарат, позволяющий при принятом критерии различения выявить взаимосвязь между исходной спектральной характеристикой и функцией представления используемых производных I и II порядка. Настоящая статья посвящена решению вышеуказанных вопросов и ставит целью выработать новый математический аппарат для оптимального использования метода производных при анализе гиперспектральных данных.

Прежде всего рассмотрим вопрос о формировании целесообразного информационного критерия. Допустим, что имеются n элементов сообщения, каждый из которых может занять m позиций. Согласно классической теории информации при равновероятных позициях и при $m \gg 1$ количество информации, извлекаемой из указанного сообщения, определяется как

$$M = n \log_2 m. \quad (1)$$

Теперь допустим, что имеется N таких сообщений. Следовательно, в этом случае из (1) имеем

$$M(N) = \sum_{i=0}^N n_i \log_2 m, \quad (2)$$

при этом $n_i = n_j; i, j = \overline{0, N}$.

С учетом вышесказанного выражение (2) перепишем в виде

$$M(N) = \sum_{i=0}^N i \log_2 m + \sum_{i=0}^N (N-i) \log_2 m. \quad (3)$$

При условии равенства первой и второй суммы на правой стороне выражения (3) имеем

$$M(N) = 2 \sum_{i=0}^N i \log_2 m. \quad (4)$$

Выражение (4) применительно к диапазону длин волн в непрерывном виде имеет вид

$$M(N)_H = 2 \int_0^{\lambda_m} \lambda \log_2 m d\lambda. \quad (5)$$

С учетом равенства

$$m = k_1 S_m, \quad (6)$$

где

$$k_1 = \Delta S; \frac{S_m}{\Delta S} \gg 1 \quad (7)$$

выражение (5), принимаемое в качестве интегрального информационного критерия, приобретает следующий вид:

$$M_0 = 2 \int_0^{\lambda_m} \lambda \log_2 (k_1 S_m) d\lambda. \quad (8)$$

Полученный информационный интегральный критерий может быть применен в целях анализа гиперспектральных данных следующим образом.

Допустим, что для обработки гиперспектральных данных используется производная первого порядка. При этом осуществляются следующие операции:

1) применяется функция представления первой производной в виде

$$\phi = \phi(S'(\lambda)), \quad (9)$$

где ϕ – функция представления $S'(\lambda)$; $S'(\lambda)$ – первая производная спектральной функции $S(\lambda)$;

2) осуществляется суммирование $S(\lambda)$ и $\phi(S'(\lambda))$, т.е.

$$S_m = S(\lambda) + \phi(S'(\lambda_x)). \quad (10)$$

Таким образом, с учетом выражений (8) и (10) получаем

$$M_0 = 2 \int_0^{\lambda_m} \lambda \log_2 (k_1 [S(\lambda) + \phi(S'(\lambda))]) d\lambda. \quad (11)$$

Предлагаемый метод анализа гиперспектральных данных с применением первой производной – метод интегрального информационного преобразования, заключающийся в следующем:

1) выражение (11) представляется в виде интегрального информационного функционала, противопоставляющего функции представления ϕ и спектральной функции $S(\lambda)$ в составе выражения (11) некоторую количественную оценку;

2) выражение (11) также представляется в виде интегрального оператора, обеспечивающего однозначное преобразование функции φ в функцию $S(\lambda)$ и, наоборот, с учетом известного уравнения Эйлера – Лагранжа, согласно которому функция $S(\lambda)$, будучи экстремалью функционала типа

$$M_0 = \int_0^{\lambda_m} P(S(\lambda), S'(\lambda), \lambda) d\lambda, \quad (12)$$

должна удовлетворить условию уравнению Эйлера – Лагранжа [9, 10]

$$\frac{\partial P}{\partial S(\lambda)} - \frac{dP}{d\lambda} \left(\frac{\partial P}{\partial S'(\lambda)} \right) = 0. \quad (13)$$

Рассмотрим два примера взаимно однозначного преобразования функции φ в функцию $S(\lambda)$.

Пример 1. Допустим, что функция φ представляет собой операцию возведения в квадрат.

В этом случае функционал (11) принимает следующий вид:

$$M_0 = 2 \int_0^{\lambda_m} \lambda \log_2 (k_1 [S(\lambda) + \phi(S'(\lambda))^2]) d\lambda. \quad (14)$$

С учетом выражений (13) и (14) легко получить следующее выражение:

$$S(\lambda) = \lambda^2. \quad (15)$$

Следовательно, в данном примере виды функций φ и $S(\lambda)$ совпадают.

Пример 2. Допустим, что

$$\phi = \exp(S'(\lambda)). \quad (16)$$

В этом случае функционал (11) принимает следующий вид:

$$M_0 = 2 \int_0^{\lambda_m} \lambda \log_2 (k_1 [S(\lambda) + \exp(S'(\lambda))]) d\lambda. \quad (17)$$

С учетом выражений (13) и (17) легко вычислить следующий вид функции $S(\lambda)$:

$$S(\lambda) = \int \ln \lambda d\lambda. \quad (18)$$

Таким образом, предлагаемый метод обработки гиперспектральных данных с помощью производных первого порядка позволяет вычислять $S(\lambda)$ по заданному виду функции φ и, наоборот, по критерию экстремума информационного контента гиперспектральных данных, скорректированных путем суммирования к гиперспектральному сигналу производной первого порядка. Очевидно, что с точки зрения информационной техники при анализе гиперспектральных данных потребуется, чтобы информационный функционал, используемый в качестве критерия, достиг не абстрактной экстремальной величины, а конкретно максимального значения. Для этого следует проверить решение задачи на наличие слабого или сильного минимума, а если они отсутствуют – решить задачу на максимум путем рассмотрения решения задачи оптимизации, используя целевой функционал, взятый с отрицательным знаком.

Вместе с тем очевидно, что количество информации в гиперспектральных данных не может быть отрицательной величиной. Следовательно, в практическом плане полученные результаты могут быть использованы в следующем порядке: сформированные пары, состоящие из исходно задаваемых функций φ и соответственно вычисленных функций $S(\lambda)$, не должны быть использованы на практике обработки гиперспектральных данных рассмотренными выше методами, так как в этом случае достигается минимальная информативность результатов обработки.

Библиографический список

1. Tsai, F. A derivative aided hyperspectral image analysis system for land cover classification / F. Tsai, W. D. Philpot // IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing. – 2002. – Vol. 40, № 2. – P. 416–424.
2. Hyperspectral image classification of grass species in northeast / S. T. Monteiro, K. Uto, Y. Kosugi, K. Oda, Y. Lino, G. Saito. – Japan : IGARSS, 2008. – P. 399–402.
3. Derivative analysis of absorption features in hyperspectral remote sensing data of carbonate sediments / E. M. Louchard, R. P. Reid, C. F. Stephens, C. O. Davis, R. A. Leathers, T. V. Dowles, R. Maffione // Optics Express. – 2002. – Vol. 10, № 26. – P. 1574–1584.
4. Bajwa, S. G. Hyperspectral image Data, Mining for Band Selection in Agricultural Applications / S. G. Bajwa, P. Bajcsy, P. Groves, L. F. Tian // Transactions of the ASAE. – 2004. – Vol. 47 (3). – P. 895–907.
5. Hoffbeek, J. P. Classification of high dimensional multispectral image data / J. P. Hoffbeek, D. A. Langrebe // In the Fourth Annual JPL Airborne Geoscience Workshop. – Washington D.C., 1986.
6. Martin, M. E. Measurements of canopy chemistry with 1992 Aviris data at Blackhawk Island and Harvard Forest / M. E. Martin, J. D. Aber // In the Fourth Annual JPL Airborne Geoscience Workshop: AVIRIS / ed. R. O. Green. – Pasadena, CA, 1993. – Vol. 1. – P. 113–116.
7. Huguenin, R. L. Intelligent Information extraction from reflectance spectra: absorption band position / R. L. Huguenin, J. L. Jones // J. Geophys. Res. – 1986. – № 91(B9). – P. 9585–9589.
8. Kawata, S. Adaptive smoothing of spectroscopic data by a linear mean – square estimation / S. Kawata, S. Minami // Appl. Spectrosc. – 1984. – № 38 (1). – P. 49–58.
9. Эльсгольц, Л. Е. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л. Е. Эльсгольц. – М. : Наука, 1974. – С. 434.
10. Васильев, Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач / Ф. П. Васильев. – М. : Наука, 1988. – 552 с.

Асадов Хикмет Гамид оглы

доктор технических наук, профессор,
НИИ Аэрокосмической информатики
Национального аэрокосмического агентства
(Азербайджанская Республика,
г. Баку, ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: asadzade@rambler.ru

Asadov Khikmet Gamid ogly

doctor of technical sciences, professor,
Research Institute of Aerospace Informatics
of National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundov street, Baku,
Republic of Azerbaijan)

Исмаилов Камал Хейраддин оглы

доктор технических наук, доцент,
Национальная академия авиации
(Азербайджанская Республика,
г. Баку, пос. Бина, 25-й км)
E-mail: kamal.ismaylov@mail.ru

Ismailov Kamal Kheyreddin oglu

doctor of technical sciences, associated professor,
National Academy of Aviation
(25-th km., Bina, Baku, Republic of Azerbaijan)

Джахидзаде Шана Низами гызы

докторант,
НИИ Аэрокосмической информатики
Национального аэрокосмического агентства
(Азербайджанская Республика,
г. Баку, ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: zshane@mail.ru

Djahidzadeh Shana Nizami gizi

doctorant,
Research Institute of Aerospace Informatics
of National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundov street, Baku,
Republic of Azerbaijan)

УДК 528.72

Асадов, Х. Г.

Метод интегрального преобразования для применения производных спектральной характеристики в анализе гиперспектральных данных / Х. Г. Асадов, К. Х. Исмаилов, Ш. Н. Джахидзаде // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 55–60. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-8.

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 53.082.9: 612.172.4

DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-9

В. Г. Полосин

ЭНТРОПИЙНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ОБНАРУЖИТЕЛИ ЗУБЦОВ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА

V. G. Polosin

ENTROPY-PARAMETRIC DETECTORS OF WAVES OF AN ELECTROCARDIO SIGNAL

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Внедрение мобильных информационных технологий сформировало предпосылки для совершенствования алгоритмов медицинского диагностического оборудования. Предметом исследования является метод обнаружения диагностически значимых интервалов электрокардосигнала (ЭКС). Цель работы состоит в исследовании возможностей обнаружения зубцов ЭКС, основанных на информационно-вероятностных технологиях анализа ЭКС. **Материалы и методы.** В работе рассмотрен качественно новый информационно-вероятностный подход обработки и анализа ЭКС, согласно которому обнаружение зубцов ЭКС основано на изменении активности кардиомиоцитов в зависимости от фазы развития потенциала действия и зависимости как производных изменения ЭКС, так и информационной энтропии значений ЭКС от термодинамической активности тканей сердца. **Результаты.** Обнаружители QRS комплекса, построенные на вероятностной и информационной неопределенности значений ЭКС, обладают дополнительной возможностью оценки положения максимума R зубца и определения важного диагностического показателя – RR-интервалов ЭКС, необходимого для определения частоты сердечных сокращений и исследования variability сердечного ритма. Реализация оператора суммы второй и третьей производных при построении обнаружителей QRS комплекса и зубцов ЭКС базируется на контроле временной зависимости суммы центральных моментов третьего и четвертого порядка, рассчитываемых для выборки значений ЭКС в скользящем окне. Нелинейная зависимость моментов высокого порядка от разниц между значениями в скользящем окне обеспечивает достоверное обнаружение QRS комплекса и зубцов ЭКС.

A b s t r a c t. Background. The introduction of mobile information technologies has formed prerequisites for improving the algorithms of medical diagnostic equipment. The subject of the study is the method of detection of diagnostic significant intervals of the electrocardiogram (ECS). The aim of the work is to investigate the possibilities of detecting EKS teeth based on information-probabilistic technologies of ECS analysis. **Materials and methods.** The paper considers a qualitatively new information-probabilistic approach of processing and analysis of ECS, according to which the detection of ECS waves is based on a change in the activity

of cardiomyocytes depending on the phase of development of the action potential. It is based on the change derivatives the ECS and on the information entropy of the sample of the values of ECS which are associated with the thermodynamics activity of the heart tissue. **Results.** Detector of QRS complex that constructed on probabilistic and information uncertainties of the ECS values has the additional ability to estimate the position of the maximum R wave and to determine an important diagnostic parameter – the RR intervals of the ECS that is necessary for determining the heart rate and for examining the variability of the heart rhythm. The implementation for the sum operator of the second and third derivatives in the construction detectors of the QRS complex and the ECS wave is based on the control of the times dependence of the sum for central moments of the third and fourth order calculated for the selection of the values of the ECS in the sliding window. The non-linear dependence of high-order moments on the differences between the values in the sliding window provides a reliable detection of the QRS complex and the ECS wave.

К л ю ч е в ы е с л о в а: информационно-вероятностный подход, энтропия, неопределенность значений, моменты третьего и четвертого порядка, зубцы электрокардиосигнала.

Key words: information-probabilistic approach, entropy, uncertainty of values, moments of the third and fourth order, wave of the electrocardiosignal.

Введение

Современная медицина стала одной из передовых отраслей научной и прикладной деятельности, важнейшей задачей которой является своевременная профилактика и снижение рисков заболеваний на основе разработки новых эффективных методов ранней диагностики начала развития патологий. Внедрение в клиническую практику новых информационных технологий сформировало предпосылки для перехода медицинской диагностики на новый технологический уровень и предопределило развитие нового поколения аппаратуры мониторингового контроля. Современные мобильные приложения, включенные в сеть телеметрического мониторинга [1–4], обладают возможностью предварительной обработки электрокардиографической информации с целью выявления временных интервалов кардиоциклов и ее визуализации, удобной для восприятия медицинским специалистом.

В последнее десятилетие наблюдается устойчивая тенденция в использовании микрокомпьютерных средств обработки ЭКС, отличающихся эффективностью при построении алгоритмов автономного анализа [5, 6]. Такие системы разрабатываются для того, чтобы проводить процесс обработки ЭКС в 12 отведениях при проведении Холтеровского мониторинга в реальном масштабе времени. Для этих целей необходимо детектирование QRS комплекса и зубцов ЭКС в реальном времени. Такие мониторинговые системы содержат алгоритмы записи интервала аномальной ЭКГ и их передачи в медицинское учреждение. Несмотря на технологические возможности обработки результатов, существующие системы строятся на основе алгоритмических подходов, направленных на применение детерминированных моделей сердца и структурного анализа на основе использования фильтров. Сложная внутренняя структура биологического объекта предполагает случайное изменение контролируемых параметров и сигналов, обусловленное наличием хаоса в его организации. Автоволновые процессы распространения трансмембранного потенциала действия в проводящей системе сердца и системе распространения возбуждения относятся к хаотическим процессам, так как полностью определены организацией внутренней структуры тканей сердца. В условиях хаотических изменений контролируемого объекта особое значение приобретает объединение вероятностной и информационной концепций для построения систем контроля и мониторинга состояния сердца. При формировании концепции предложен метод энтропийно-параметрической обработки ЭКС, на основе которого предложены решения прикладных задач. В статье автором рассмотрены некоторые решения, иллюстрирующие возможности применения меры энтропийно-параметрического потенциала для построения обнаружителя зубцов ЭКС.

Методы обнаружения R зубца

Основные технологические приемы, положенные для построения алгоритмов обнаружителей *QRS* комплексов для ЭКС, рассмотрены в работах [7–10]: технологии фильтров, технологии дифференцирования, технологии машинных шаблонов, алгоритм Пана – Томкинса, корреляционные технологии.

В литературе при реализации обнаружителя *QRS* комплекса в реальном времени применяют различные модификации алгоритма Пана – Томсона, технологическая последовательность обработки которого дана на рис. 1. Алгоритм состоит из следующей последовательности: аналого-цифрового преобразования ЭКС (АЦП), фильтра нижних частот (ФНЧ), фильтра высоких частот (ФВЧ), оператора производной (ОП), нелинейного преобразователя (НП) интегратора скользящего окна (ИСО), порогового детектора (ПД) и алгоритма поиска (АП).

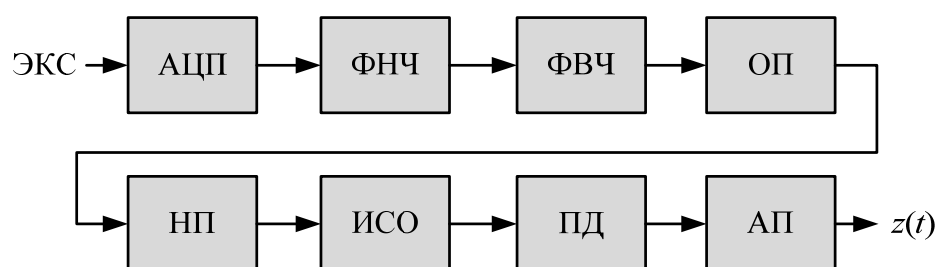


Рис. 1. Последовательность обработки Пана – Томсона

Для обнаружения *QRS* комплекса в реальном времени необходимы процедуры фильтрации низкочастотных и высокочастотных помех. Оператор производной включен в алгоритм для подавления низкочастотных компонент *P* и *T* зубцов. Нелинейный преобразователь усиливает большие разности, характерные для *QRS* комплекса и подавления малых разностей *P* и *T* комплексов посредством возведения в квадрат. Для сглаживания пиков в алгоритм включен интегратор типа скользящего окна.

В настоящее время широко распространены алгоритмы, основанные на цифровом дифференцировании сигнала [7–9, 11]. Операция взятия производной усиливает быстрое изменение сигнала *QRS* комплекса и подавляет медленные изменения *P* и *T* зубцов. Недостаток метода производных состоит в весьма высокой чувствительности производных к высокочастотному шуму, поэтому для применения этого метода необходимо существенное сглаживание сигнала. Применение низкочастотных фильтров для сглаживания сигнала или фильтров высокой частоты для стабилизации изоэлектрической линии вносят существенные искажения в форму биосигналов и влияют на их диагностические свойства [12, 13]. Фильтрация ЭКС влияет на амплитуды длительности и смещение интервалов ЭКС, поэтому в последнее время при проведении диагностического анализа ЭКС рекомендуется учитывать состав фильтров, включенных при регистрации сигнала. В связи с тем, что применение низкочастотных фильтров для фильтрации помех сильно искажают ЭКС, использование разностных операторов производной при цифровой обработке сигнала ограничено нахождением второй производной.

Снизить влияние шума при использовании операторов производных удастся за счет применения для построения операторов производных отношений статистической и информационной неопределенности ограниченного количества N отсчетов выборки скользящего окна к его длительности, равного произведению количества N на время получения одного отсчета Δt . Подобный прием был использован для построения фазовых траекторий [14].

Термодинамика активности сердца

Изменение ЭКС на поверхности торса обусловлено электрической активностью при распространении трансмембранного потенциала действия в тканях сердца. Перемещение ионов в организме происходит под действием градиента электрохимического потенциала и вызывает продукцию термодинамической энтропии в тканях сердца, связанную с изменением

энергетических состояний отдельных ионов. Из условия, что при распространении потенциала действия в миокарде концентрация ионов внутриклеточной и межклеточной средах практически не меняется, стационарное состояние ионной системы миокарда устойчиво. Изменение концентраций ионов при распространении трансмембранного потенциала действия обуславливает генерацию электрохимического потенциала $\bar{\mu}$ и, как следствие, распространение ионного электрического тока в проводящей среде организма. Термодинамическое происхождение энтропии контролируемого потенциала объединяет термодинамические и информационные процессы при обработке ЭКС. Открытие и закрытие ионных каналов приводит к отклонению от стационарного состояния. Усиление электрической активности сердца отражается в увеличении неопределенности выборки значений скользящего окна, что используется для определения зубцов ЭКС.

Информационный и вероятностный анализ при обнаружении временных интервалов ЭКС

При разработке систем Холтеровского мониторинга ценность алгоритмов обработки записи ЭКС с помощью дешифратора определяется точностью реализации основных функций автоматического анализа ЭКС. К основным процедурам анализа относятся процедуры обнаружения, распознавания и классификации *QRS* комплексов [1, 15].

При реализации функций обнаружения сегментов ЭКС современные алгоритмы ориентированы на анализ формы сигналов, для которых необходимо выполнение процедуры предварительной фильтрации низкочастотных и высокочастотных помех, устранения тренда изолинии и исключения артефактов [7, 8, 10, 11].

Автором работы предложен качественно новый информационно-вероятностный подход обработки и анализа ЭКС, согласно которому обнаружение зубцов ЭКС основано на изменении активности кардиомиоцитов в зависимости от фазы развития потенциала действия. Так как диффузионная составляющая электрохимического потенциала является электродвижущей силой ионных токов в биологической среде и создает потенциал на поверхности торса, то увеличение термодинамической активности тканей сердца при деполяризации и первой фазе реполяризации миокарда увеличивает изменение значений ЭКС. Классически для выявления увеличения скорости изменения ЭКС используются операторы первой и второй производных, усиливающие высокочастотные составляющие помех.

Обнаружитель QRS комплекса

Очевидно, что появление активности тканей сердца меняет распределение значений ЭКС в выборке скользящего временного окна. Вероятностные и энтропийные характеристики выборок значений скользящего окна содержат информацию об интенсивности изменения потенциала отведения во времени. Изменение неопределенности потенциала отведения в выборке значений ЭКС скользящего окна, отнесенное к длительности, имеет свойство оператора первой производной ЭКС.

Качественное отличие вероятностных и информационных оценок неопределенности выборки значений ЭКС от разницы между двумя рядом расположенными значениями ЭКС в том, что такие оценки учитывают характер вероятностного распределения значений потенциала для всей выборки скользящего окна. В статистике для оценки неопределенности выборки значений используют среднее квадратическое отклонение, рассчитываемое для значений скользящего окна с помощью формулы

$$\sigma(t_i) = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N (u_{t-N/2+j} - u_{cp})^2}, \quad (1)$$

где t_i – момент времени для оценки статистической неопределенности выборки значений ЭКС; u_i – значение ЭКС в i -й момент времени; N – количество значений в выборке ЭКС скользящего окна.

Информационная неопределенность ЭКС проводится на основе оценки энтропии выборки значений ЭКС скользящего окна, определяемая как математическое ожидание логарифма

рифта функции плотности вероятности. Для расчета энтропии в скользящем окне используется формула

$$H(t_i) = - \sum_{s=1}^m \left(\frac{n_{si}}{N} \ln \left(\frac{n_{si}}{N \Delta u} \right) \right), \quad (2)$$

где m – количество интервалов группирования данных ($m = \lceil \sqrt{N} \rceil$); n_{si} – количество результатов, попавших в s -й интервал группирования данных для i -го момента времени; Δu_{si} – ширина интервала группирования результатов.

При построении обнаружителя и предварительного выделения QRS комплекса применено свойство оператора первой производной ЭКС, которым обладают вероятностная и информационная неопределенности потенциала отведения ЭКС скользящего окна. В качестве оператора первой производной использовано отношение энтропийно-параметрического потенциала, отнесенное к интервалу временного окна. Формула для расчета энтропийно-параметрического потенциала имеет вид

$$\Delta_{\text{оп}}(t_i) = \sqrt{\sigma^2(t_i) + 0,25 \exp(2H(t_i))}. \quad (3)$$

На рис. 2 показано изменение энтропийно-параметрического потенциала $\Delta_{\text{оп}}(t_i)$ для выборки значений скользящего окна в различные моменты времени t_i . Там же показаны изменения энтропийной $\Delta_s(t_i)$ и параметрической $\sigma(t_i)$ составляющих потенциала.

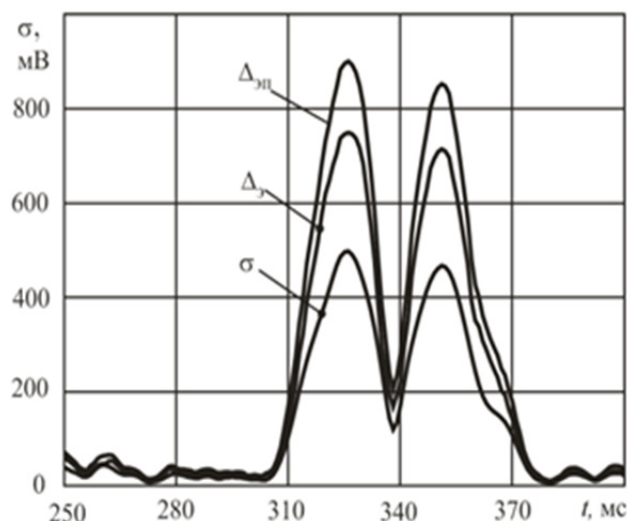


Рис. 2. Изменение оператора первой производной в скользящем окне при обнаружении QRS комплекса

Точки минимума энтропийно-параметрического потенциала соответствуют положению максимумов R зубцов, что делает возможным оценку RR -интервалов на основе вероятностной и информационной обработки значений потенциалов ЭКС скользящего временного окна.

Таким образом, обнаружители QRS комплекса, построенные на вероятностной и информационной неопределенности значений ЭКС, реализуют операцию первой производной и содержат возможность оценки положения максимума R зубца – важного диагностического показателя, необходимого для определения частоты сердечных сокращений и для исследования variability сердечного ритма [15, 16].

Обнаружитель зубцов ЭКС на основе моментов высокого порядка

Другой эффективный подход анализа кардиографической информации основан на оценке центральных моментов высокого порядка для значений ЭКС скользящего окна. Методика аппроксимации распределения выборки значений ЭКС скользящего окна с помощью стати-

стического степенного ряда дана в работе [17]. Формула для расчета j -го значения u_j выборки ЭКС, сортированной в порядке возрастания, имеет вид

$$u_j = \text{Me}(U) + \sigma(U) \left(\frac{j}{N} - 0,5 \right) \left(1 + \sum_{s=3}^n \left(\frac{\mu_s(U)}{(\mu_2(U))^s (Nk)^{s-2} (s-1)!} \right) \right), \quad (4)$$

где $\text{Me}(U)$, $\sigma(U)$ и $\mu_s(U)$ – медиана, среднее квадратическое отклонение и моменты s -го порядка, рассчитанные для выборки U случайных значений ЭКГ скользящего окна; k – коэффициент вариации: $k = [1 \dots 3]$.

Из формулы (4) следует, что для сортированной выборки значений коэффициенты разложения аппроксимаций по степенным составляющим имеют свойства производных s -го порядка. Тогда коэффициенты разложения аппроксимаций можно рассматривать как операторы производных s -го порядка, найденных на основе центральных моментов выборки значений ЭКС для скользящего временного окна. Применение операторов производных s -го порядка позволило модифицировать известные методы выделения QRS комплекса, применяемые в традиционном алгоритмическом анализе ЭКС, что позволило разработать новые способы обнаружения и предварительного выделения QRS комплекса посредством вероятностного и информационного анализа выборки значений скользящего окна.

Обнаружитель QRS комплекса, построенный на контроле временной зависимости суммы центральных моментов третьего $\mu_3(t_i)$ и четвертого $\mu_4(t_i)$ выборки значений ЭКС в скользящем окне, представляет собой реализацию оператора суммы второй и третьей производных. В этом случае контролируемый параметр $X_\mu(t_i)$ для выборки скользящего окна в текущий момент времени рассчитан по формуле

$$X_\mu(t_i) = \frac{\mu_3(t_i)}{\mu_{3\max}} + \frac{\mu_4(t_i)}{\mu_{4\max}}, \quad (5)$$

где $\mu_{3\max}$ и $\mu_{4\max}$ – максимальные значения третьего и четвертого центральных моментов, рассчитанные для интервала времени наблюдения ЭКС.

Временной интервал для QRS комплекса определен из условия, что контролируемая величина $X_\mu(t_i)$ больше порогового значения $X_{\mu n}$:

$$|X_\mu(t_i)| > X_{\mu n}. \quad (6)$$

Пример работы обнаружителя QRS комплекса показан на рис. 3, где обозначено: 1 – QRS комплекс ЭКС; 2 и 3 – центральные моменты 3-го и 4-го порядка, приведенные к их максимальным значениям; 4 – справедливость неравенства (6).

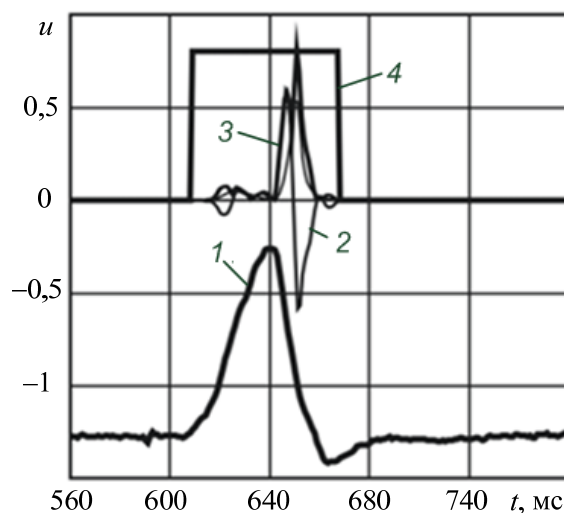


Рис. 3. Изменение операторов суммы производных второго и третьего порядка в скользящем окне

Пороговое значение контролируемого параметра X_{μ} для обнаружения QRS комплекса при достоверности обнаружения 0,95 устанавливается на уровне $10^{-1} \dots 10^{-2}$. Высокая достоверность обнаружения QRS комплекса достигается благодаря нелинейной зависимости моментов высокого порядка от максимальной разницы между текущим $u(t_j)$ и средним $\bar{u}(t_i)$ значениями в скользящем окне.

Различие активности кардиомиоцитов во время деполяризации и реполяризации отражены в разности значений скользящего окна QRS комплекса и разницы значений T и P -зубцов. Пример обнаружения QRS комплекса, P и T -зубцов дан на рис. 4, где цифрами обозначены: 1, 2 и 3 – QRS комплекс, T и P -зубцы соответственно.

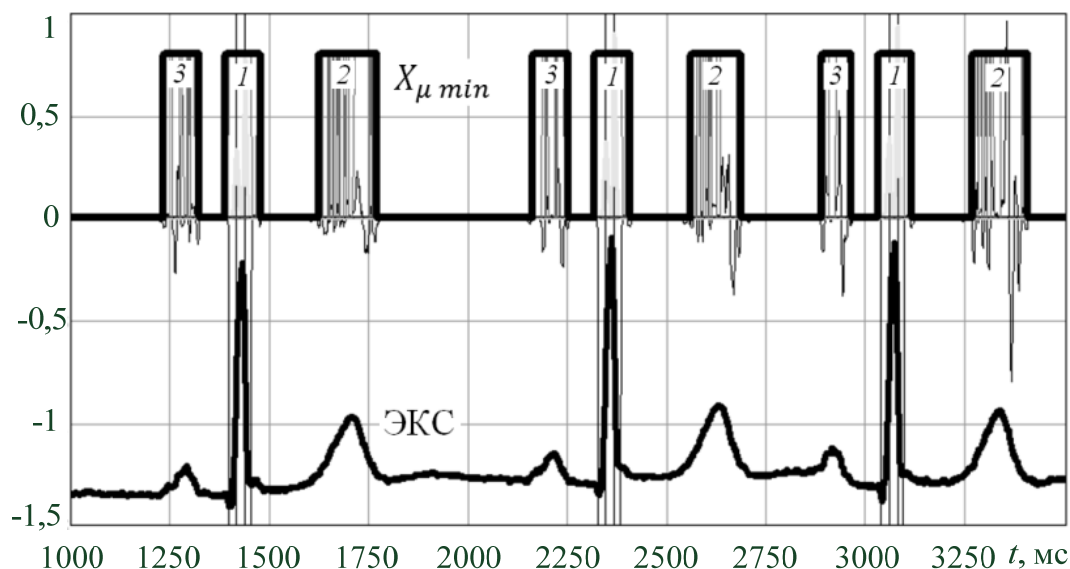


Рис. 4. Обнаружение QRS комплекса, P и T -зубцов

Если разницы значений QRS комплекса в 4...10 раз больше разниц значений T и P зубцов, то отношение контролируемого параметра $X_{\mu}(t_i)$ во временных интервалах QRS комплекса и зубцов отличается на 3...6 порядков. В связи с тем, что разницы значений, обусловленные высокочастотными и низкочастотными помехами, в разы отличаются от разниц значений зубцов, применение контролируемого параметра $X_{\mu}(t_i)$ в скользящем временном окне делает возможным обнаружение зубцов ЭКС за счет установления порогового значения на уровне $10^{-6} \dots 10^{-4}$ для P – зубцов и $10^{-4} \dots 10^{-2}$ для T -зубцов. Так как критерии $X_{\mu min}$ для QRS комплекса и зубцов отличаются на два-три порядка, применение критерия позволяет однозначно различить обнаруженные сегменты ЭКС.

Обсуждение результатов

В целях улучшения определения диагностически значимых интервалов ЭКС на основе информационно-статистического анализа были разработаны два способа обнаружения QRS комплекса: *первый способ* реализует оценку неопределенности значений выборки скользящего окна, *второй способ* построен на сумме центральных моментов третьего и четвертого порядка. Применение центрированных статистических оценок, рассчитанных на основе всей выборки скользящего окна, обеспечивает нечувствительность обнаружителей к низкочастотным помехам и дрейфу ЭКС, так как возможность оценки контролируемых параметров непосредственно по выборке значений ЭКС снижает воздействие высокочастотных помех. При сравнении возможностей обнаружителей QRS -комплекса следует отметить возможность обнаружителя, построенного на основе оператора первой производной, в котором реализуется определение максимума положения R зубца, необходимое для определения частоты сердеч-

ных сокращений ЧСС по длительности *RR*-интервалов и исследования вариабельности сердечного ритма.

Реализация обнаружителей *QRS*-комплекса и *P-T*-зубцов на основе энтропийно-параметрического потенциала является гибким инструментом, удобным на этапе диалогового анализа ЭКС. Реализации способа контроля временной зависимости суммы третьего и четвертого моментов для выделения *QRS* стабильны при реализации автоматического анализа ЭКС. В связи с тем, что интенсивность изменения состояния электрической системы сердца при реполяризации миокарда сопоставима с интенсивностью артефактов двигательной активности и наводимыми помехами, в автоматическом режиме возможно только обнаружение *T* и *P*-зубцов с помощью оператора суммы второй и третьей производной. Для повышения достоверности выделения и последующего анализа зубцов необходима предварительная обработка сигнала, предусматривающая подавление помех и исключение артефактов.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы. В настоящее время объединение вероятностного и информационного направления развития методов обработки ЭКС в мобильных системах мониторинга формирует тенденцию перехода средств медицинской диагностики на новый качественный уровень. Основные свойства обнаружителей комплекса *QRS* и зубцов ЭКС обусловлены термодинамической взаимосвязью между электрической активностью тканей сердца и неопределенностью выборки значений ЭКС скользящего временного окна, которое обнаруживается по увеличению энтропийно-параметрического потенциала во временных интервалах зубцов ЭКС. Нелинейные свойства оператора суммы второй и третьей производных, реализованной на основе суммы приведенных к максимальным значениям центральных моментов третьего и четвертого порядка выборки значений скользящего окна, позволяет достоверно обнаруживать *QRS*-комплекс, *T* и *P*-зубцы. Вероятностный анализ неупорядоченности значений выборки ЭКС с целью обнаружения временных интервалов *QRS*-комплекса, *T*-зубца, *RR*- и *ST*-интервалов проводится непосредственно по зарегистрированным выборочным данным, информация которых не искажена в результате предварительной обработки данных с целью подавления помех. Такой подход позволяет изменить структуру системы мониторинга, добавив качественно новые возможности как на этапе регистрации ЭКС, так и на этапе автоматического анализа с помощью дешифратора.

Библиографический список

1. Национальные Российские рекомендации по применению методики холтеровского мониторирования в клинической практике // Российский кардиологический журнал. – 2014. – № 2 (106). – С. 6–71.
2. Пат. 2540528 Российская Федерация. Устройство для регистрации электрокардиосигнала в условиях свободной двигательной активности / Бодин О. Н., Кривоногов Л. Ю., Петровский М. А., Рахматуллин Ф. К., Иванчуков А. Г., Бальзанникова Е. А., Папшев Д. В. ; Бюл. № 4.
3. A new telemonitoring system intended for chronic heart failure patients using mobile telephone technology – feasibility study/ S. Winkler, M. Schieber, S. Lucke et al. // Int J Cardiol. – 2011. – Nov. 17, № 153 (1). – P. 55–63.
4. Telemonitoring with implantable electronic devices in young patients with congenital heart diseases / P. A. Zartner, N. Toussaint-Goetz, J. Photiadis et al. // Europace. – 2012. – Feb. 2.
5. Бодин, О. Н. Методы и средства обработки кардиографической информации : монография / О. Н. Бодин. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2008. – 350 с.
6. Бодин, О. Н. Концепция диагностики состояния сердца в условиях свободной активности / О. Н. Бодин, А. Г. Иванчуков, В. Г. Полосин, М. А. Петровский // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – URL: www.science-education.ru/120-16008 (дата обращения: 12.09.2015).
7. Рангайян, Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / Р. М. Рангайян. – М. : Физматлит, 2007. – 440 с.
8. Clifford, G. D. Signal processing methods for heart rate variability analysis / G. D. Clifford. – PhD Thesis michaelmas Term., 2002. – 244 p.

9. Digital Signal Processing. C-Language Examples and Laboratory experiments for the IBM PC // ECG QRS Detection / ed. Tomkins W. J. – 2000. – 450 p.
10. Пат. 2410023 Российская Федерация. Способ выделения QRS-комплекса электрокардиосигнала / Бодин О. Н., Зайцева О. А. Кривоногов Л. Ю., Логинов Д. С., Рахматуллин Ф. К. ; Бюл. № 1.
11. A comparison of the noise sensitivity of nine QRS detection algorithms / G. S. Friesend, T. S. Jannett, M. A. Jadallan, S. L. Yates, S. R. Quint, H. T. Nagle // IEEE Trans. Biomed Eng. – P. 85–97.
12. Дроздов, Д.В. Влияние фильтрации на диагностические свойства биосигналов / Д. В. Дроздов // Функциональная диагностика. – 2011. – № 3. – С. 75–78.
13. Burri, H. Simulation of myocardial infarction by ECG filters / H. Burri, H. Sunthorn, D. Shah // Journal of Electrocardiology. – 2006. – Vol. 39, iss. 3. – P. 253–258.
14. Полосин, В. Г. Статистические методы построения фазовой траектории электрокардиосигнала / В. Г. Полосин, О. Н. Бодин, С. А. Балахонова, Р. В. Рябчиков // Фундаментальные исследования. – 2014. – Т. 12, № 9. – С. 2660–2665.
15. Рябыкина, Г. В. Холтеровское и бифункциональное мониторирование ЭКГ и артериального давления / Г. В. Рябыкина, А. В. Соболев. – М. : Медпрактика – М, 2016. – 352 с.
16. Рахматуллин, Ф. К. Чреспищеводная электрокардиостимуляция сердца и клиническая электрофизиология антиаритмических средств: монография / Ф. К. Рахматуллин. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2006. – 112 с.
17. Полосин, В. Г. Способ статистического анализа электрокардиографической информации / В. Г. Полосин // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – № 10. – С. 120–126.

Полосин Виталий Германович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра физики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: polosin-vitalij@yandex.ru

Polosin Vitaly Germanovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of physics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 53.082.9: 612.172.4

Полосин, В. Г.

Энтропийно-параметрические обнаружители зубцов электрокардиосигнала / В. Г. Полосин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 61–69. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-9.

А. Г. Убиенных

СЕРДЕЧНЫЕ АРИТМИИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ИХ РАЗМЕРНОСТИ

A. G. Ubiennykh

CARDIAC ARRHYTHMIAS FROM VIEW POINT OF ITS DIMENSION

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Целью работы является исследование сердечных аритмий исходя из их пространственной размерности. **Материалы и методы.** Теоретическую и методологическую основу исследования составили труды в области неинвазивной кардиодиагностики, биологии и математической физики. В ходе исследования проанализированы основные механизмы возникновения сердечных аритмий с точки зрения их пространственного размера. При проведении исследований использовались методы кардиологии, вычислительной математики и теории дискретных систем. **Результаты.** Предложена классификация сердечных аритмий исходя из размерности распространения волны возбуждения в сердце, рассмотрены механизмы этих групп аритмий, проведено концептуальное моделирование аритмий, обусловленных механизмом риентри. **Выводы.** Полученные результаты позволят повысить эффективность диагностики сердечных аритмий у пациентов.

A b s t r a c t. Background. The aim is to investigate the cardiac arrhythmias based on their spatial dimension. **Materials and methods.** The theoretical and methodological basis of the research was the works in the field of non-invasive cardio diagnosis, biology and mathematical physics. The main mechanisms of occurrence of cardiac arrhythmias from the point of view of their spatial size were analyzed. During the research, the methods of cardiology, computational mathematics and the theory of discrete systems were used. **Results.** The classification of cardiac arrhythmias is suggested based on the dimension of the excitation wave propagation in the heart, the mechanisms of these arrhythmia groups are considered, the conceptual modeling of arrhythmias caused by the reentry mechanism is carried out. **Conclusions.** The results obtained will increase the diagnostic efficiency of cardiac arrhythmias in patients.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сердечные аритмии, риентри, спиральные волны, математическое моделирование, модель ФитцХью – Нагумо.

К e y w o r d s: cardiac arrhythmias, reentry, spiral waves, mathematical modeling, Fitz-Hugh – Nagumo model.

Введение

Сердечные аритмии являются важной проблемой здравоохранения, так как в значительной степени связаны с повышенным риском сердечно-сосудистых осложнений и внезапной смерти, приводят к снижению качества жизни, инвалидности, высокой смертности и повышению экономических затрат здравоохранения. В связи с этим изучение распространенности нарушений ритма и проводимости сердца является одной из актуальных задач современной кардиологии. Строго говоря, сердечная аритмия – это любое отклонение сердечбиения от

строгой периодичности. В этом смысле все живые существа все время страдают аритмией, поскольку нормальное сердцебиение никогда не бывает точно периодическим. Однако представляющими интерес аритмиями являются те, которые считаются ненормальными и которые имеют нетривиальные физиологические последствия.

Нормальный сердечный ритм

Прежде чем обсуждать сердечные аритмии, дадим описание нормального сердечного ритма. Человеческое сердцебиение – это сокращение сердечной мышцы, которое стимулируется электрическим событием, происходящим примерно один раз в секунду, в течение которого каждая клетка в сердце испытывает быстрые изменения трансмембранного потенциала, продолжающиеся около 300 мс, прежде чем вернуться в состояние покоя. Эти изменения, называемые потенциалом действия, являются волной электрической активности. Эта волна электрической активности (рис. 1) инициируется небольшим скоплением клеток в правом предсердии около верхней полой вены, называемом синоатриальным (синусным, синусно-предсердным) узлом (*SA*). Эти клетки являются автономными генераторами и синхронизируются локальной электрической связью. После инициирования волна электрической активности распространяется по предсердиям, заканчиваясь на предсердной желудочковой перегородке (*AV*-перегородке), непроводящей перегородке между предсердиями и желудочками. Эта волна активности входит в еще один небольшой участок клеток в *AV*-перегородке, атрио-вентрикулярный (предсердно-желудочковый) узел (*AV*-узел), через который она медленно распространяется. Покидая *AV*-узел, волна входит в пучок специализированных волокон, называемых системой Гиса – Пуркинье, состоящей из пучка Гиса, ветвей связок и волокон Пуркинье, которые разветвляются древовидным образом, чтобы достичь внутренней (эндокардиальной) стенки желудочков. Возникает возбуждение у волокон Пуркинье для активации желудочковой ткани, распространяющееся изнутри наружу, заканчивая эпикардом.

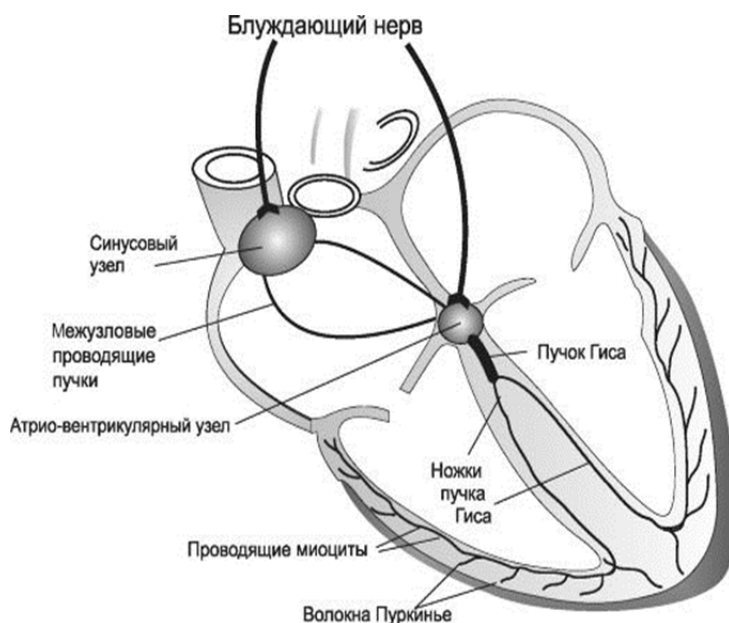


Рис. 1. Схема системы сердечной проводимости

Мышечные клетки сердца подразделяются на три типа, каждый из которых выполняет свои функции. Одни клетки находятся в колебательном режиме, другие возбуждаются и распространяют электрический потенциал. Наконец, остальные возбуждаются и под действием указанного потенциала сокращаются, способствуя этим выталкиванию крови. Каждая клетка специализирована на контакт с близлежащими клетками.

Активный потенциал, приводящий к сокращению предсердий и желудочков сердца, генерируется в специальных клетках, называемых пейсмекерами (водителями ритма), или *P*-клетками. Указанные клетки входят в состав всех отделов проводящей системы сердца.

При этом наблюдается градиент автоматии сердца, т.е. снижение степени автоматизации различных участков сердца. У человека в покое частота возбудимости в 1 мин SA -узла – 60–80, AV -узла – 40–50, пучка Гиса – 30–40, волокон Пуркинье – около 20. В нормальных физиологических условиях генератором автоматии сердца является SA -узел, активность остальных очагов автоматии подавлена.

Профиль бегущей волны передающих клеток проводящей системы сердца (второй тип клеток) примерно симметричный, имеет амплитуду около 80 мВ, длительность приблизительно 0,2 с. Особое положение занимают волокна Пуркинье. Они содержат ансамбли как пейсмейкерных клеток, так и передающих клеток.

Клетки третьего типа, составляющие миокард предсердий и желудочков, называемые кардиомиоцитами, имеют сократительный механизм, подобный поперечнополосатым (скелетным) мышцам. Механизм сокращения этих мышц сравнительно хорошо изучен.

Стандартным диагностическим инструментом для клинической оценки сердечного ритма является ЭКГ, которая измеряет потенциал поверхности тела, создаваемый движущейся волной (рис. 2). Нормальная ЭКГ имеет три характерных сигнала: P -волну, соответствующую активации предсердий, комплекс QRS , соответствующий активации желудочков, и T -волну, соответствующую восстановлению (возврат к покою) желудочков.

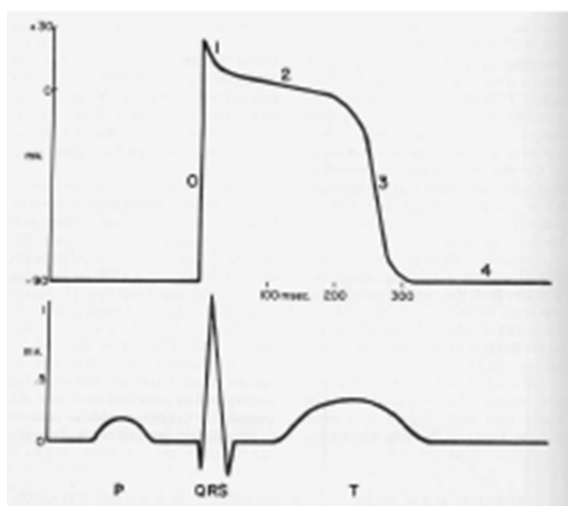


Рис. 2. Трансмембранный потенциал клетки и электрокардиограмма. Верхняя часть рисунка представляет собой трансмембранный потенциал одного миоцита желудочков, а нижняя – показывает потенциал поверхности тела во время того же электрического события. Числа на верхней части обозначают фазы цикла действия: 0 – ход вверх; 1 – короткий всплеск; 2 – плато; 3 – быстрое восстановление; 4 – потенциал покоя

Диагностические критерии нормального синусового ритма [1]:

- положительный зубец P во II стандартном отведении;
- постоянный и нормальный интервал PQ ;
- постоянная форма зубца P в каждом отведении;
- постоянное расстояние $P-P$ или $R-R$.

Основные механизмы аритмий с точки зрения их размерности

Аритмии нулевой размерности. Аритмиями нулевой размерности являются те, которые связаны с одиночными клетками или небольшими наборами клеток и не полагаются на пространственное расположение клеток. Эти клетки изменяют свое поведение от нормального до определенного типа ритмического или аритмического поведения. Например, клетки SA -узла являются автономными осцилляторами, и нарушение автоматизма их работы вызывает нотопные аритмии (синусовая тахикардия, синусовая брадикардия, синусовая аритмия). При этом пейсмейкером остается SA -узел, но происходит изменение параметров следования импульсов. Другой пример – эктопический центр, представляющий собой совокупность кле-

ток, которая подавляет возбудимость SA-узла и становится новым пейсмейкером. Эктопические центры могут появляться в предсердиях, AV-перегородке, желудочках сердца. Это приводит к гетеротопным аритмиям, задающим замедленные или ускоренные ритмы.

Одномерные аритмии. Одномерные аритмии названы так потому, что их существование опирается на одномерный путь распространения. Классический пример одномерной аритмии связан с синдромом преждевременного возбуждения Вольфа – Паркинсона – Уайта (Wolff – Parkinson – White). Для него характерна аномальная проводимость сердечной ткани между предсердиями и желудочками, проявляющаяся в возвратной тахикардии и суправентрикулярной тахикардии. Участок, являющийся причиной заболевания, называется пучком Кента. Он может быть расположен между двумя предсердиями и соединяется с одним любым желудочком. При таком синдроме потенциал действия поступает в желудочки через пучок Кента, распространяется ретроградно вдоль волокон Пуркинье к AV-узлу, оттуда в предсердии, вызывая циркуляцию волны. Постоянно циркулирующий волновой фронт приводит к очень быстрому сердечному ритму с высокой активностью накачки крови.

Одномерные реципрокные тахикардии были впервые изучены в начале 1900-х гг. Майнсом (G. R. Mines) [2], когда он намеренно отрезал кольцо ткани вокруг верхней полой вены и сумел инициировать волны, которые проходили только в одном направлении.

Двумерные аритмии. Двумя наиболее распространенными реципрокными аритмиями являются тахикардия и фибрилляция. Обе они могут возникать в предсердиях (предсердная тахикардия и предсердная фибрилляция) или в желудочках (желудочковая тахикардия и фибрилляция желудочков). Когда они возникают в желудочках, они опасны для жизни.

Двумерные аритмии связаны с двумерными самоподдерживающимися волнами активности, спиральными волнами, такими как встречающиеся в предсердиях во время предсердной тахикардии или фибрилляции. Причина, по которой эти аритмии считаются дву-, а не трехмерными, заключается в том, что стенка предсердий довольно тонкая.

Трехмерные аритмии. Трехмерные аритмии вызываются самоподдерживающимися волнами электрической активности, которые происходят в желудочках, и называются свитковыми волнами или волнами прокрутки. Они трехмерные, а не двумерные, потому что желудочковая стенка довольно толстая. Предположение, что волны риентри в желудочках должны быть подобны свитку, было сделано довольно рано в работе Уинфри (A. T. Winfree) [3], однако экспериментальная проверка этого наступила гораздо позже.

Наблюдение, что риентеративные аритмии в желудочках являются трехмерными, имеет важные клинические последствия. Если аритмия одномерна, тогда должна быть точка где-то в цепи, которая может быть разрушена, что устранил аритмию. Аналогично, если двумерная аритмия является результатом быстрой периодической стимуляции от эктопического центра (т.е. неповторного входа), то разрушение осциллятора устранил аритмию. Однако если точка на поверхности желудочков является точкой первой активации, нет никакой гарантии, что эта точка является эктопическим фокусом или точкой в одномерной схеме. Фактически риентеративная аритмия, циркулирующая глубоко внутри ткани, может иметь точку на поверхности, на которой она впервые появляется, но поскольку аритмия поддерживается трехмерным повторным циклом, разрушение поверхностных клеток не будет иметь никакого влияния на аритмию.

Моделирование аритмий, обусловленных механизмом риентри

Одной из причин возникновения аритмий является механизм повторного обратного входа волны, или риентри (от англ. re-entry). Риентри представляет собой режим, при котором волна возбуждения циркулирует по кругу. Такая циркуляция может возникнуть вокруг естественной неоднородности (шрама, крупной артерии), если каким-то образом симметрия проведения возбуждения оказывается нарушена и циркуляция начинается в одном из направлений. К примеру, возникает участок, который пропускает волны возбуждения только в одном направлении. Такой эффект называется одноподнаправленным блоком и является необходимым условием возникновения риентри (рис. 3).

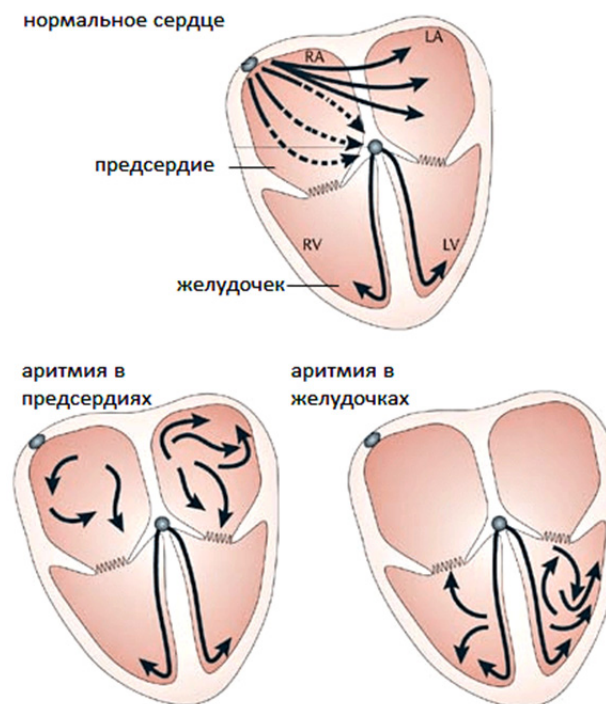


Рис. 3. Нормальное и аномальное распространение возбуждения по сердечной ткани

Существует множество моделей описания сердечной ткани, учитывающее перечисленные выше эффекты. Так или иначе, все модели состоят из двух частей: реакции в точке и распространения импульса в пространстве.

По типу описания среды, в которой распространяется волна, модели сердечной ткани могут быть разделены на три класса: монодоменные, бидоменные и мультидоменные. Монодоменные модели рассматривают возбудимую среду как единый резервуар, в котором ионы распространяются посредством диффузии. В бидоменных моделях внутренность клеток (клеточный синцитий) и межклеточное пространство рассматриваются как два отдельных резервуара с различными концентрациями ионов. Мультидоменные модели содержат множество резервуаров, которыми могут быть внутренние объемы отдельных клеток, межклеточные щели и т.д.

Монодоменные модели отличаются между собой компонентой, ответственной за реакцию. К числу монодоменных моделей с упрощенным реакционным членом относятся модели ФитцХью – Нагумо [4, 5] и Алиева – Панфилова [6], активно используемые ныне для качественного описания фундаментальных эффектов в сердечной ткани.

В настоящей работе использовались уравнения ФитцХью – Нагумо

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= C\epsilon^{-1} \left(u - \frac{u^3}{3} - v \right) + \Delta u; \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= \epsilon (u + \beta - \gamma v)\end{aligned}\tag{1}$$

с параметрами $\epsilon = 0,03$, $\beta = 0,7$, $\gamma = 0,8$. Эти уравнения, как известно, являются наиболее подходящими для концептуальных исследований волн вихревого типа [7].

Уравнения (1) в двумерной области имеют бесконечно большое количество топологически различных решений. Конкретное решение из бесконечно большого их количества может быть получено путем задания специально подобранных начальных условий или специально подобранных внешних воздействий. В работе исследовались следующие способы возбуждения волн риентри:

1. Стимуляция по двум точкам, где одна точка располагается в центре области, а другая – на частично рефракторной первой волны возбуждения.

2. Стимуляция «кросс-поле», где один стимул прикладывается к левой границе области, вызывая плоскую волну, а другой – к нижней границе области.

Моделирование проводилось в среде MATLAB 8 в прямоугольной области размером 128×128 , уравнения решались с помощью метода конечных разностей для пространственных производных и явным интегрированием Эйлера для производных по времени. Применялись граничные условия Неймана. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

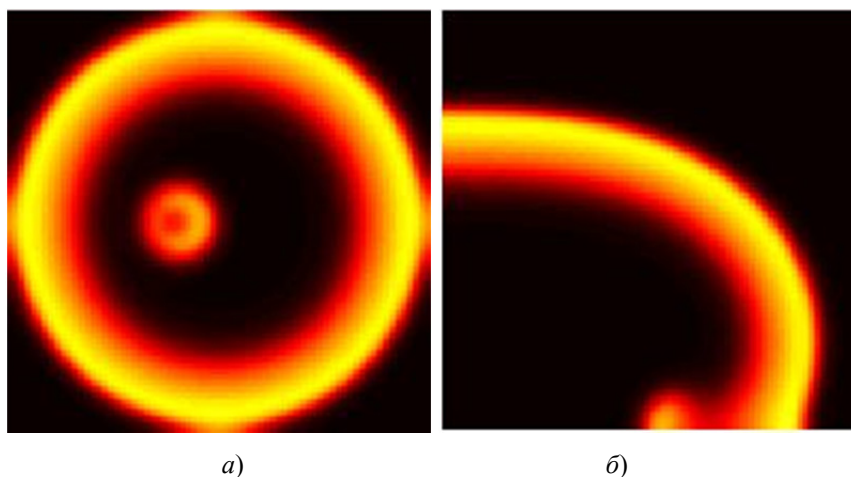


Рис. 4. Волна возбуждения:

а – стимуляция по двум точкам; *б* – стимуляция «кросс-поле»

Проведенные вычислительные эксперименты подтверждают возможность существования разнообразных топологически различных волн риентри.

Приближенное решение уравнений (1) сеточными методами в областях сложной формы и при наличии неоднородностей в области встречает значительные технические трудности. Для преодоления их в работе [8] предлагается метод сканирования. Метод основан на использовании конечно-разностной пространственной аппроксимации системы (1) и решении полученной системы обыкновенных дифференциальных уравнений одним из численных методов по шести траекториям, одна из которых (ведущая) равномерно сканирует область сложной формы, а другие траектории образуют точки, лежащие слева, справа, сверху и снизу от любой точки ведущей траектории. Шестая траектория описывает граничные условия.

Заключение

Исходя из размерности распространения волны возбуждения в сердце предложена классификация сердечных аритмий, рассмотрены механизмы этих групп аритмий. На основе уравнений ФитцХью – Нагумо проведено концептуальное моделирование аритмий, обусловленных механизмом риентри. Полученные в работе результаты позволят повысить эффективность диагностики сердечных аритмий у пациентов. Дальнейшая работа представляется в исследовании трехмерных аритмий с реалистической геометрией сердца человека.

Библиографический список

1. Кушаковский, М. С. Аритмии сердца / М. С. Кушаковский, Ю. Н. Гришкин. – СПб. : Фолиант, 2014. – 720 с.
2. Mines, G. R. On circulating excitations in heart muscle and their possible relation to tachycardia and fibrillation / G. R. Mines // Trans. Roy. Soc. Can. – 1914. – Vol. 4. – P. 43–59.
3. Winfree, A. T. Scroll-shaped waves of chemical activity in three dimension / A. T. Winfree // Science. – 1973. – Vol. 181. – P. 937–939.
4. FitzHugh, R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane / R. FitzHugh // Biophysical J. – 1961. – Vol. 1, № 6. – P. 445–466.
5. Nagumo, J. An active pulse transmission line simulating nerve axon / J. Nagumo, S. Arimoto, S. Yoshizawa // Proc. IRE. – 1962. – № 50. – P. 2061–2070.

6. Aliev, R. R. A simple two-variable model of cardiac excitation / R. R. Aliev, A. V. Panfilov // Chaos Solutions and Fractals. – 1996. – Vol. 7, № 3. – P. 293–301.
7. Алиев, Р. Р. Концептуальные и детальные модели электрической активности миокарда: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Р. Р. Алиев. – Пушино, 2007. – 46 с.
8. Калюжный, И. М. Вычислительная система для исследования автоволновых процессов / И. М. Калюжный // Программные продукты и системы. – 2011. – № 2. – С. 122–125.

Убиенных Анатолий Геннадьевич

старший преподаватель,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: utolg@mail.ru

Ubiennykh Anatoliy Gennad'evich

senior lecturer,
sub-department of data-computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 612.173; 536.758

Убиенных, А. Г.

Сердечные аритмии с точки зрения их размерности / А. Г. Убиенных // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 70–76. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-10.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 620.171.20

DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-11

*А. С. Ишков, А. В. Светлов, Г. А. Солодимова, С. И. Торгашин***КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕЗИСТИВНЫХ
ПОТЕНЦИОМЕТРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАСТРОВОЙ
ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ***A. S. Ishkov, A. V. Svetlov, G. A. Solodimova, S. I. Torgashin***MONITORING THE TECHNICAL STATE
OF RESISTIVE POTENTIOMETERS USING SCANNING
ELECTRON MICROSCOPY**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются резистивные проволочные потенциометры, рассмотрены структура и состав изделий, определены основные узлы, обеспечивающие соответствие эксплуатационных характеристик установленным требованиям. Предметом исследования являются способы выявления дефектов, образующихся в резистивном элементе и деталях проволочных потенциометров в процессе их изготовления. Целью работы является разработка способов изготовления высоконадежных потенциометров с применением средств технического контроля на основе растровой электронной микроскопии. *Материалы и методы.* Для проведения исследований по выявлению внутренних скрытых дефектов проволочных потенциометров использован метод рентгеноспектрального микроанализа, позволяющего проводить контроль дефектов микро- и наноразмерных объектов и выполнять анализ химического состава материалов. *Результаты.* Рассмотрены виды и механизм влияния дефектов проволочных потенциометров, приводящих к их отказам. Установлено, что нарушение шага намотки резистивного элемента, микротрещины и посторонние включения являются основными видами дефектов. Разработаны рекомендации по совершенствованию технологического процесса изготовления проволочных потенциометров, позволяющие снизить процент брака в их производстве. Приведены технические решения, позволяющие улучшить качество резистивного элемента. *Выводы.* Контроль технического состояния проволочных потенциометров с применением растровой электронной микроскопии позволяет улучшить качество и надежность изделий путем совершенствования технологии изготовления и выявления дефектов, не обнаруженных визуально.

A b s t r a c t. *Background.* The object of research is resistive wire potentiometers, the structure and composition of products are considered, the main nodes are determined, ensuring the compliance of performance characteristics with the established requirements. The subject of the study are methods of detecting defects formed in the resistive element and the details of the wire potentiometers during their manufacture. The aim of the work is the development of methods for manufacturing highly reliable potentiometers using the means of

technical control based on scanning electron microscopy. **Materials and methods.** To conduct research on the detection of internal hidden defects of wire potentiometers, an x-ray spectral microanalysis method was used to monitor defects in micro- and nanoscale objects and perform an analysis of the chemical composition of materials. **Results.** The types and mechanism of influence of wire potentiometer defects, leading to their failures, are considered. It is established that the violation of the winding step of the resistive element, microcracks and foreign inclusions are the main types of defects. The recommendations for improving the technological process for manufacturing wire potentiometers have been developed, which make it possible to reduce the percentage of rejects in their production. Technical solutions allowing to improve the quality of the resistive element are given. **Conclusions.** Monitoring the technical condition of wire potentiometers with the use of scanning electron microscopy can improve the quality and reliability of products by improving the manufacturing technology and detecting defects that are not detected visually.

К л ю ч е в ы е с л о в а: проволочные потенциометры, отказ, резистивный элемент, электронный растровый микроскоп.

Key words: wire potentiometers, failure, resistive element, electronic raster microscope.

Проволочные потенциометры широко используются в качестве первичных измерительных преобразователей в различных автоматизированных системах контроля, наведения и управления, электронно-коммуникационных устройствах, бытовой электронике, радио- и телеоборудовании, искусственных дыхательных аппаратах и т.д. Основным недостатком резистивных потенциометров является небольшой срок службы из-за наличия механического контакта, что привело к утрате их позиций на рынке и замене цифровыми датчиками [1]. Тем не менее успехи материаловедения последних лет, а также использование современного контрольно-измерительного оборудования существенно улучшили характеристики проволочных потенциометров. Их конкурентным преимуществом является моментальное восстановление коэффициента преобразования, соответствующего его текущему положению, после потери питания, что недоступно цифровым датчикам.

Проволочный потенциометр является сложным электромеханическим изделием, что следует из представленной на рис. 1 структуры и используемого количества комплектующих, входящих в его состав.

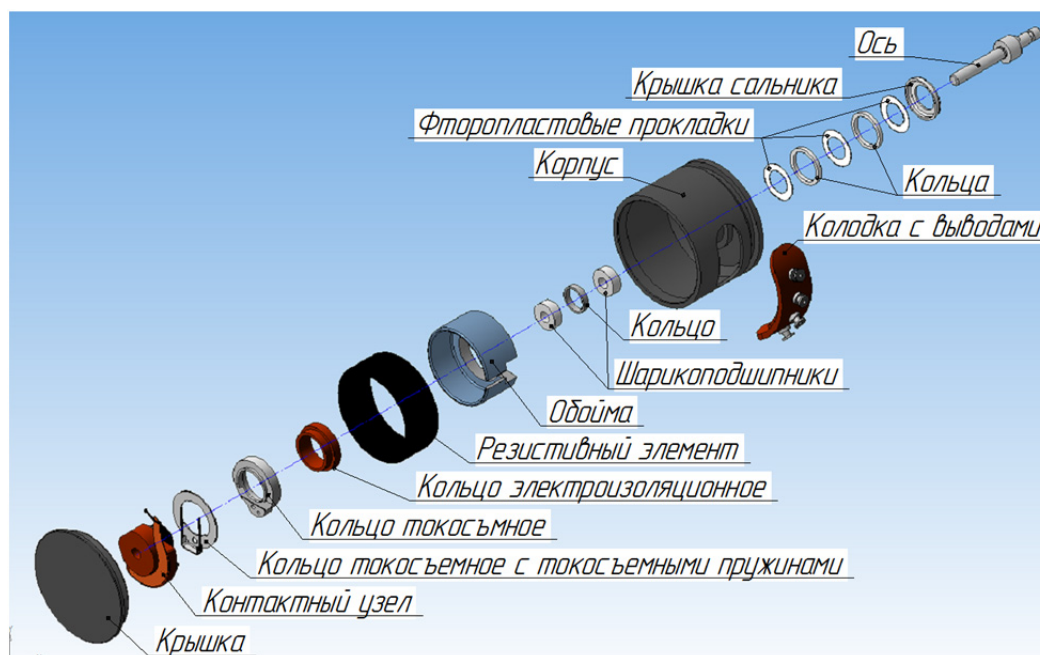


Рис. 1. Структура и состав проволочного потенциометра

Основу проволочного потенциометра составляет резистивный элемент, представляющий собой кольцевой каркас с намотанной резистивной проволокой. Комплексом свойств, обеспечивающих конкурентные эксплуатационные характеристики проволочных потенциометров, обладает резистивная проволока из специальных сплавов на основе хрома, меди, марганца [2]. Важным требованием является малое и стабильное во времени контактное сопротивление проводящего материала в паре с материалом скользящего контакта. Значение диаметра проволоки зависит от точности и сопротивления изделия: 0,01...0,10 мм – для потенциометров высокого класса; 0,1...0,4 мм – для потенциометров низкого класса [3].

На стадии проектирования проволочных потенциометров их соответствие требуемым техническим характеристикам обеспечивается рядом факторов (конструкция изделия, номенклатура комплектующих и материалов), обеспечивающих стабильность параметров в процессе функционирования при наличии климатических и механических воздействий. Правильная организация на предприятии системы входного контроля позволяет выявить дефекты материалов, не обнаруженные их изготовителем, и дефекты, проявившиеся при транспортировании и хранении [4].

При изготовлении проволочных потенциометров основными способами обеспечения их качества являются: применение высококачественного технологического и измерительного оборудования, соблюдение климатических условий при сборке изделий, рациональный состав технологических операций и проверок, жесткий контроль правильности выполнения каждой технологической операции [5].

В условиях жесткой финансовой экономии необходима разработка и внедрение системы контроля дефектов, позволяющей сформировать своевременные эффективные предупредительные действия для устранения их повторного появления, произвести модификацию изделия и внести усовершенствования в технологический процесс его производства для уменьшения рисков и финансовых потерь, связанных с выводом из эксплуатации изделия.

Основной причиной конструктивных и технологических отказов проволочных потенциометров являются их внутренние скрытые дефекты, образующиеся в резистивном элементе и деталях в процессе изготовления и не обнаруженные визуально [6]. Для анализа причин и видов отказов потенциометров применен метод рентгеноспектрального микроанализа, основанный на использовании растрового электронного микроскопа «Vega 3 SBH» фирмы «Tescan», снабженного системой рентгеноспектрального микроанализа и имеющего следующие основные характеристики:

- разрешение – 3 нм при 30 кВ, 8 нм при 3 кВ;
- ускоряющее напряжение – от 200 В до 30 кВ;
- внутренний диаметр камеры образцов – 160 мм.

Данный микроскоп выбран в качестве основного инструмента контроля технического состояния потенциометров и анализа дефектов, так как обеспечивает измерение линейных размеров и контроль дефектов микро- и наноразмерных объектов, проведение микроанализа материалов, построение профиля поверхности и измерение шероховатости бесконтактным способом.

Методом рентгеноспектрального микроанализа проведено исследование резистивного элемента и подвижного контакта потенциометров, не прошедших испытания на износоустойчивость вследствие резкого уменьшения сопротивления. С целью выяснения причин отказа и внедрения мероприятий по улучшению технологии изготовления проведены экспериментальные исследования резистивного элемента отказавших изделий. Установлено, что на их контактных дорожках имеются продукты износа в межвитковом пространстве (рис. 2).

Осмотр резистивного элемента с помощью микроскопа показал, что резистивная проволока имеет существенную деформацию в месте соприкосновения с подвижным контактом. В результате возникают наплывы материала проволоки в межвитковом пространстве, подобные заусенцам (рис. 3), образующимся при механической обработке металлов. Эти заусенцы удерживают свободные частицы износа и препятствуют их удалению. Между витками проволоки образуются перемычки и сопротивление резистивного элемента резко уменьшается. В процессе очистки удалить эти заусенцы с помощью кисти не получается, так как они имеют значительную жесткость.

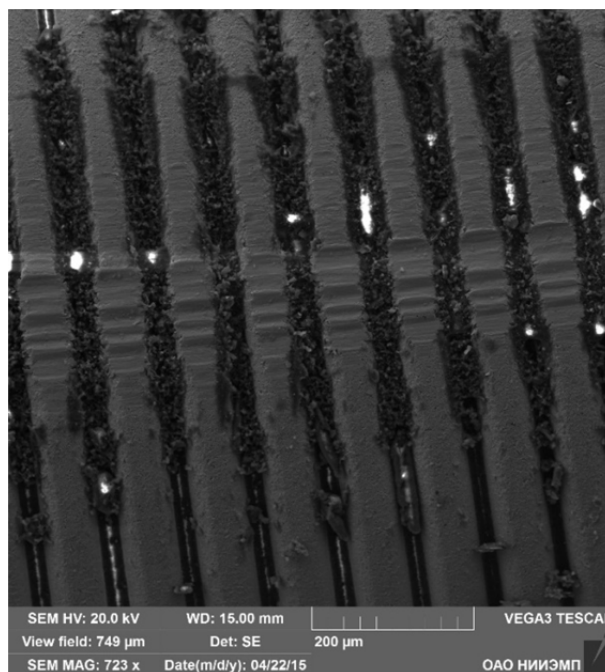


Рис. 2. Изображение резистивного элемента, содержащего частицы износа

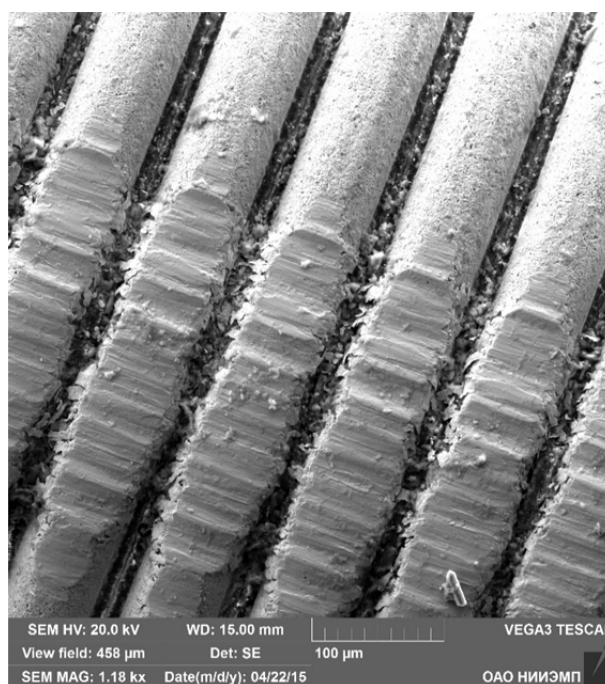


Рис. 3. Изображение резистивного элемента после очистки

Возможной причиной износа резистивного элемента явилось превышение давления контактной пружины [7]. Однако эта величина четко определена требованиями технических условий и должна тщательно контролироваться в процессе сборки. Другой вероятной причиной износа резистивного элемента является некачественный материал контактной пружины [8]. При нарушении химического состава контактная пружина может иметь излишнюю твердость, что приводит к увеличению износа резистивного элемента. Для уточнения причин отказа проведен рентгеноспектральный микроанализ контактных пружин, который не выявил отклонений в химическом составе материала, из которого были изготовлены контактные пружины. Однако в процессе исследований были найдены посторонние включения (рис. 4).

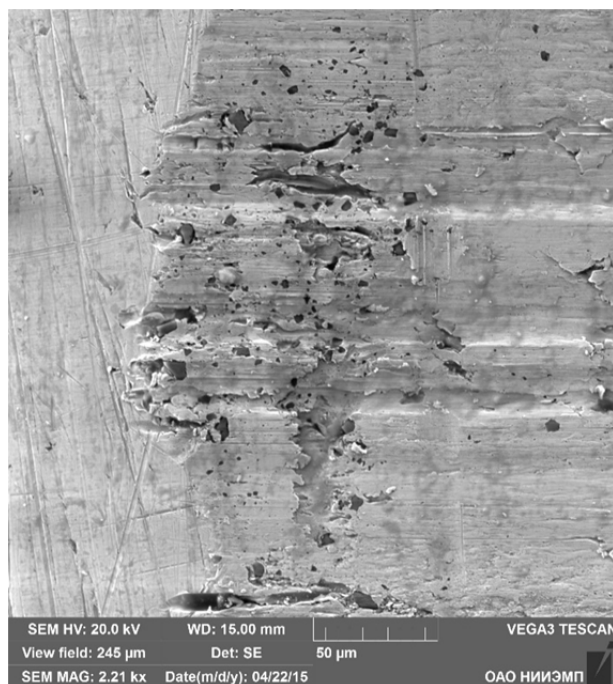


Рис. 4. Изображение контактной пружины с посторонними включениями

Анализ химического состава включений в материале пружин показал, что ими являются кристаллы оксида алюминия (корунд), которые применяются для зачистки проволоки с последующей полировкой при изготовлении потенциометров.

Несмотря на то, что в процессе изготовления резистивного элемента предусмотрена операция его очистки, частицы оксида алюминия проникли в состав основного материала контактной пружины, которые вызвали повышенный износ проволоки. При этом от резистивной проволоки стали отделяться частицы, покрытые слоем окислов, так как в процессе трения происходит сильная деформация частиц, что приводит к их повышенному окислению, так называемое фрикционное окисление [1].

В ходе проведенных экспериментальных исследований других отказавших образцов потенциометров установлено, что отказы изделий также могут быть вызваны нарушением шага намотки проволоки на каркас резистивного элемента (рис. 5).

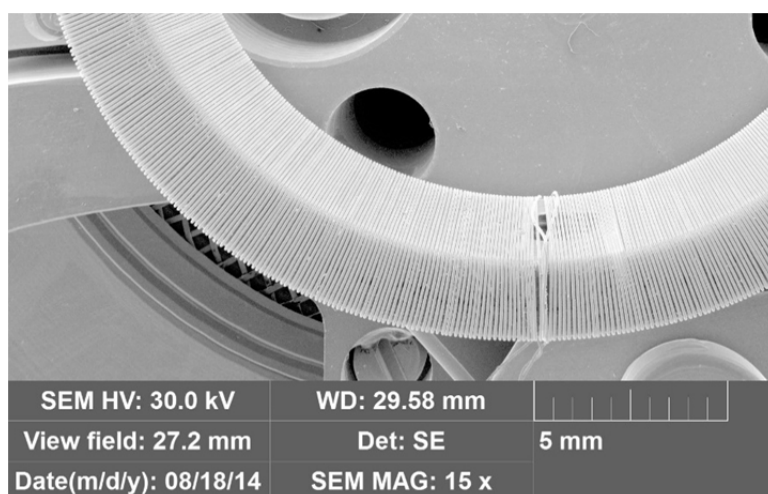


Рис. 5. Нарушение шага намотки проволоки на каркас резистивного элемента

Таким образом, проведенные эксперименты позволили выявить основные причины отказов проволочных потенциометров, которые могут быть вызваны следующими скрытыми дефектами резистивного элемента:

- нарушение шага намотки при навивке проволоки на каркас резистивного элемента;
- микротрещины резистивной проволоки, образующиеся при навивке резистивного элемента и изготовлении выводов;
- деформация резистивного элемента, наличие неоднородностей и посторонних включений.

С целью совершенствования технологии изготовления проволочных потенциометров и предотвращения повторения подобных отказов по результатам проведенных экспериментальных исследований были сформулированы следующие выводы.

1. Необходимо проведение более тщательной очистки резистивного элемента от посторонних частиц. Рекомендуется применять многоэтапную промывку резистивного элемента с использованием различных типов моечных машин (ультразвуковые, струйные) с продувкой сжатым обеспыленным воздухом. После операций очистки в технологический процесс изготовления потенциометров включить контроль каждого резистивного элемента с помощью микроскопа при большом увеличении [9].

2. Следует определить минимально допустимое давление контактной пружины на резистивную проволоку, что может снизить износ контактной пары потенциометра при сохранении его надежной работы в течение всего срока службы [10].

3. Необходимо оценить возможность применения способов зачистки и полировки резистивной проволоки без применения абразивных порошков, например, использовать химическую, ультразвуковую или лазерную зачистку.

4. В соответствии с технологией изготовления потенциометра этап контроля функциональной характеристики резистивного элемента не предусмотрен. Однако результаты исследования резистивного элемента с помощью растровой электронной микроскопии свидетельствуют о том, что необходимо внедрение в технологический процесс промежуточного этапа контроля функциональной характеристики. Это позволит на начальной стадии производства отбраковать резистивные элементы с несоответствующей техническим требованиям функциональной характеристикой, снизить процент бракованных изделий и сократить финансовые затраты на производство.

Библиографический список

1. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машгиз, 1962. – 220 с.
2. Недорезов, В. Г. Электрические свойства контактирующей пары «резистивный слой-контактная пружина» в керметных подстроечных резисторах / В. Г. Недорезов, Т. П. Каминская, С. В. Подшибякин, М. Б. Анкирская // Электронная техника. Сер. 5, Радиодетали и радиокомпоненты. – 1988. – Вып. 1 (70). – С. 20–22.
3. ОСТ В 25 21-86 Потенциометры прецизионные проволочные. Общие технические условия.
4. Ишков, А. С. Повышение качества и надежности прецизионных потенциометров / А. С. Ишков, А. И. Цыганков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – С. 136–138.
5. Ишков, А. С. Методика диагностики датчиков угла высоконадежных информационно-измерительных и управляющих систем / А. С. Ишков, В. Д. Зуев // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 8. – С. 53–57.
6. Цыганков, А. И. Исследование причин отказа датчика угла маршевых двигателей ракет-носителей / А. И. Цыганков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 4 (36). – С. 89–95.
7. Кузнецов, Е. А. О причинах устойчивого нарушения контакта потенциометров / Е. А. Кузнецов // Авиационная промышленность. – 1965. – № 2.
8. Недорезов, В. Г. Ограничения в создании однооборотных прецизионных проволочных потенциометров / В. Г. Недорезов, А. И. Цыганков, А. Ю. Доросинский // Электронные компоненты. – 2015. – № 2. – С. 88–93.
9. Ишков, А. С. Разработка новых технических решений по улучшению характеристик датчиков положения управляющих систем / А. С. Ишков, Г. А. Солодимова, А. И. Цыганков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2016. – № 2. – С. 35–40.
10. Мещеряков, В. Ф. Установка измерения контактного сопротивления резистивных элементов / В. Ф. Мещеряков, В. Г. Недорезов, М. Г. Смыченко // Электронная промышленность. – 1985. – Вып. 8 (146). – С. 67–68.

Ишков Антон Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиотехники и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: ishkovanton@mail.ru

Светлов Анатолий Вильевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

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

Торгашин Сергей Иванович

кандидат технических наук,
заведующий кафедрой ракетно-космического
и авиационного приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rkap@pnzgu.ru

Ishkov Anton Sergeevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radioengineering
and radioelectronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
senior researcher,
Scientific Research Institute
of electro-mechanical devices
(44 Karakozov street, Penza, Russia)

Svetlov Anatoliy Vil'evich

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

Solodimova Galina Anatol'evna

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

Torgashin Sergey Ivanovich

candidate of technical sciences,
head of syb-department of rocket-space
and aerospace instrumentation,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 620.171.20

Ишков, А. С.

Контроль технического состояния резистивных потенциометров с применением растровой электронной микроскопии / А. С. Ишков, А. В. Светлов, Г. А. Солодимова, С. И. Торгашин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 77–83. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-11.

А. В. Лысенко, В. С. Калашников, А. К. Гришко, Н. В. Горячев, А. С. Подсякин

УСТАНОВКА МОНИТОРИНГА ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ¹

A. V. Lysenko, V. S. Kalashnikov, A. K. Grishko, N. V. Goryachev, A. S. Podsyakin

INSTALLATION OF MONITORING DYNAMIC PARAMETERS OF ELEMENTS OF DESIGNS OF ONBOARD RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Бортная радиоэлектронная аппаратура относится к классу сложных систем с разветвленной иерархической структурой, на конструкцию которой оказывают существенное влияние внешние механические воздействия в процессе эксплуатации. Целью работы является разработка конструкции установки мониторинга динамических параметров элементов конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры, позволяющая исследовать ее спектральные колебательные характеристики.

Материалы и методы. В работе применяется динамический волновой метод исследования поведения упругих конструкций при нестационарном нагружении, основанный на исследовании поверхностных волн Релея, распространяющихся по граничной плоскости упругой среды. Для увеличения частотной линейности и снижения влияния объекта исследования был использован метод обратной электромагнитной связи. **Результаты.** Разработана новая конструкция установки для мониторинга динамических параметров элементов конструкции бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Особенностью предложенной установки является возможность исследования вибрации в местах крепления конструктивного элемента, позволяющая определять взаимное влияние элемента и основания, а также оценить демпфирующие свойства различных крепежных элементов. **Выводы.** Разработанная установка дает возможность исследовать динамические параметры элементов конструкций в местах крепления, учитывать взаимное влияние элемента и основания, а также оценить демпфирующие свойства различных крепежных элементов. Полученные с помощью установки экспериментальные данные позволяют повысить надежность проектируемой бортовой радиоэлектронной аппаратуры.

A b s t r a c t. Background. On-Board electronic equipment belongs to the class of complex systems with hierarchical branched structure, the construction of which have a significant influence of external mechanical effects in the process of operation. The aim of this work is to develop the design of the installation of monitoring dynamic parameters of elements of designs of onboard radio-electronic equipment, allowing to study its vibrational spectral characteristics. **Materials and methods.** It is used in the work of the dynamic wave approach to study the be-

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

havior of elastic structures under non-stationary loading, based on the study of surface Rayleigh waves propagating along the plane boundary of an elastic medium. To increase the frequency of the linearity and reduce the influence of the object of research was used the method of inverse electromagnetic coupling. **Results.** Developed a new design of the apparatus for monitoring dynamic parameters of structural elements of the onboard avionics. Feature of offered installation is the possibility of the study of vibration in places of fastening of the structural element, allowing to determine the mutual influence of the element and the ground, and also to evaluate the damping properties of various fasteners. **Conclusions.** The developed device gives the opportunity to explore the dynamic parameters of structural elements in the mounting locations to take into account the impact element and the ground, and also to evaluate the damping properties of various fasteners. Obtained by setting the experimental data can improve the reliability of the designed onboard avionics.

К л ю ч е в ы е с л о в а: динамические характеристики, элементы конструкции, установка, измерения, поверхностные волны, нестационарное нагружение.

Key words: dynamic characteristics, structural elements, installation, measurement, surface waves, non-stationary loading.

Введение

Силовые и несущие элементы конструкций РЭС – это стержни, рамы, пластины. При эксплуатации на подвижных носителях в этих конструкциях возникают вибрации. Возникновение резонансных колебаний в конструкциях и их элементах оказывает существенное влияние на функционирование РЭС в целом.

Поэтому оценка надежности электронного средства, предназначенного для работы в условиях динамических внешних воздействий, на этапе проектирования остается актуальной задачей [1]. Важнейшим этапом в решении этой задачи при проектировании РЭС является определение динамических характеристик (деформаций, напряжений, перемещений, ускорений) элементов конструкций, воспринимающих нестационарные внешние нагрузки (вибрации, удары, ускорение). При этом сочетание теоретических и экспериментальных методов исследования дает хорошие результаты при решении различных практических задач [2–5].

Теоретические основы метода измерений

В основу работы установки положен динамический волновой метод исследования поведения упругих конструкций (стержневых, пластинчатых) при нестационарном нагружении [6–7]. По этому методу исследуются спектральные колебательные характеристики виброизолированного объекта, закрепленного на эластичных виброизолирующих опорах или подвесах. Источники силового воздействия и приема сигналов закрепляются внешне по отношению к исследуемому объекту и входят в точечный контакт с объектом исследования (ОИ) посредством игл. Источники вибросил и виброприемники представляют собой электромеханические преобразователи магнитоэлектрического типа [8–10]. Такое устройство источника силового воздействия на практике позволяет воздействовать на ОИ именно сосредоточенной внешней силой, изменяющейся по какому-либо закону [11–13]. Непосредственно от действия этой силы в пространстве упругой среды конструктивного элемента распространяются две волны: волна расширения и волна сдвига, при распространении которых возникает дополнительное возмущение в виде волн, отраженных от свободной поверхности [14, 15].

Сдвиговая волна порождает незатухающие поверхностные волны, распространяющиеся с релеевской скоростью (волны Релея) по свободной поверхности конструктивного элемента. Когда скорость переменной внешней силы совпадает одновременно с фазовой и групповой скоростями распространяющихся в среде волн, возникают резонансные волны [16, 17]. Для конкретных конструктивных элементов (стержни, пластины) это положение формулируется так: когда частота гармонической внешней силы совпадает с одной из нормальных частот колебательной системы, в последней возникает явление резонанса, при котором амплитуда

волны начинает значительно возрастать. Эти волны фиксирует виброприемник, в подвижной катушке которого возникает электродвижущая сила, пропорциональная принимаемой виброскорости. Проведенный анализ показывает, что предлагаемое устройство (источник вибросил и виброприемник) позволяет получить в упругой системе резонансную волну, зависящую только от исследуемой системы [18].

Возбуждая в исследуемом образце различные резонансные волны путем установления соответствующей резонансной частоты воздействия, можно определить дискретный спектр собственных частот исследуемой конструкции, получить собственную форму колебаний для отдельных собственных частот, а также исследовать пространство собственных форм в случаях, близких к вырождению собственных чисел. Все это составляет спектральные колебательные характеристики виброизолированного упругого пространственного объекта, которые можно использовать в практике конструирования, например, при анализе надежности конструкций РЭС, работающих в условиях сложных внешних динамических воздействий.

Установка для определения динамических характеристик объекта исследования

В существующей практике исследования конструкций и их элементов на стойкость к внешним динамическим воздействиям производится с использованием вибростола, что ограничивает возможности измерения спектральных колебательных характеристик конструктивных элементов РЭС, поскольку объект исследования жестко закреплен на столе вибростенда. Поэтому неизбежны и неустранимы трудности при исследовании собственных форм колебаний для отдельных собственных частот и ударного воздействия в произвольной точке поверхности.

Предложенная установка свободна от указанных недостатков, потому что ОИ может быть виброизолирован от основания, вибровозбудителей и вибродатчиков. Ударные воздействия, вибровоздействия и измерение колебаний могут осуществляться в произвольно выбранных точках поверхности ОИ.

Структурная схема установки (рис. 1) состоит из трех звеньев: измерительного звена 1, эталонного звена 2 и сравнительного звена 3.

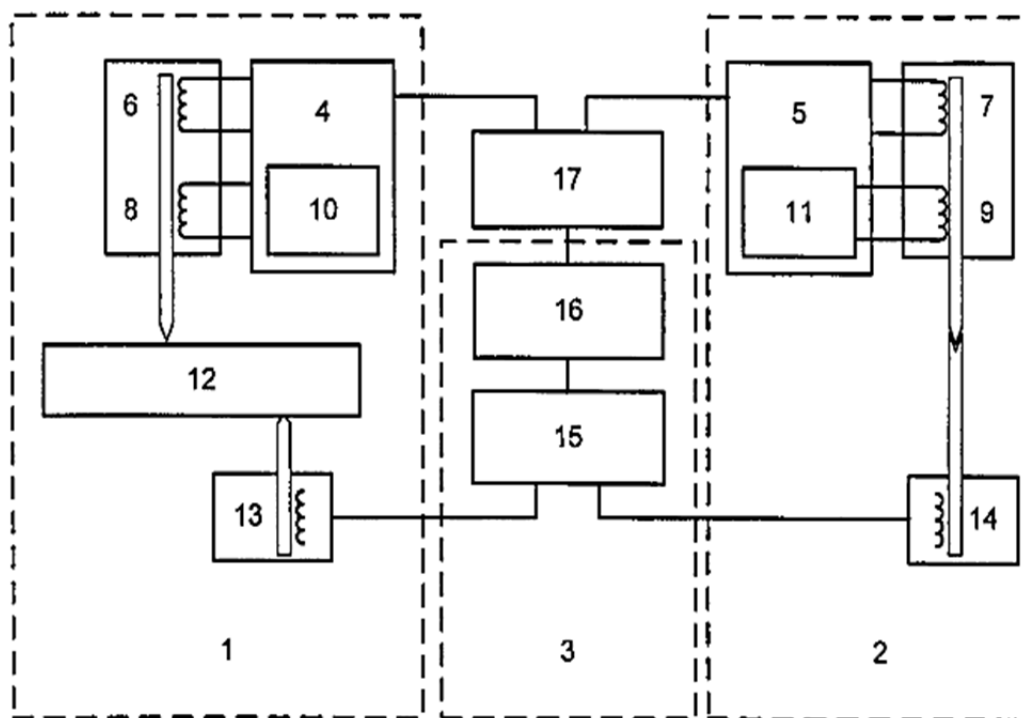


Рис. 1. Структурная схема установки для исследования динамических характеристик элементов РЭС

Измерительное и эталонное звенья состоят из усилителя мощности 4, 5, необходимого для передачи сигнала на возбуждающую обмотку 6, 7; измерительной обмотки 8, 9; цепи элек-

трехмеханический обратной связи (ЭМОС) 10, 11, необходимой для снижения влияния ОИ на передаточную функцию вибровозбудителя; исследуемого образца 12 и вибропреобразователя 13, 14.

Сравнительное звено установки включает в себя аналого-цифровой преобразователь 15, необходимый для преобразования аналогового сигнала от вибропреобразователя с последующей передачей на ЭВМ 16 для сравнительного анализа. Сюда же входит цифроаналоговый преобразователь 17 для преобразования в аналоговый сигнал возбуждения с последующей передачей на усилитель мощности.

На рис. 2 показана конструкция установки. Она состоит из основания 18, элементов крепления объекта исследования 19, объекта исследования 20, вибровозбудителей 21, 22 и датчиков 23, 24. Датчики крепятся на регулируемой крепежной рейке основания 25, а вибровозбудители – на регулируемых штативах 26. При необходимости датчики тоже могут устанавливаться на регулируемых штативах. Объект исследования может быть виброизолирован от основания посредством резиновых амортизаторов, устанавливаемых на регулируемых опорах 27.

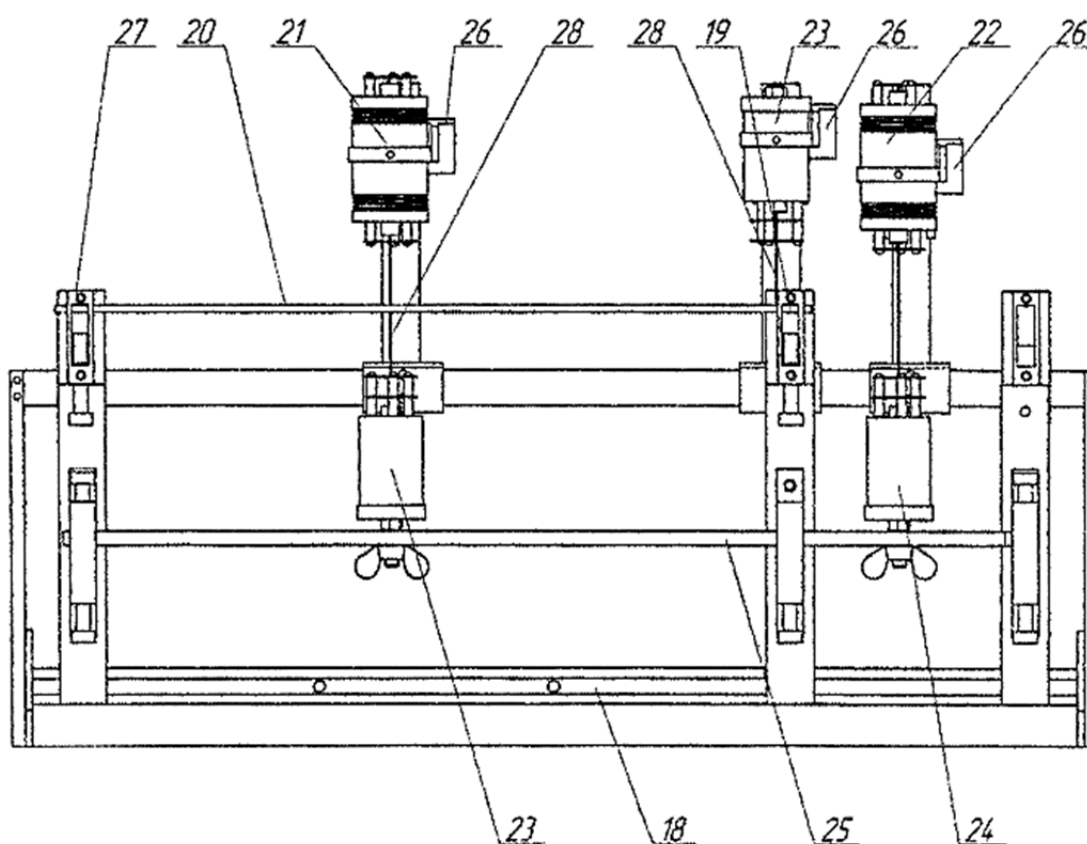


Рис. 2. Конструкция измерительной установки

Во время работы вибровозбудители входят в точечный контакт с ОИ посредством стержневых толкателей 28, осуществляющих необходимое нажатие на поверхность. Амплитуда сил вибровоздействия для систем с малыми потерями в несколько раз меньше инерционных сил, поэтому они в расчете необходимой силы прижатия толкателя не являются определяющими. В результате взаимодействие ОИ с внешней средой осуществляется лишь статическими силами и силами инфранизких частот. Для сил частот исследуемого диапазона система оказывается виброизолированной, что обеспечивается наличием во всех взаимодействующих с системой устройствах упругого промежуточного звена с малой жесткостью, практически полностью отражающего колебания.

В данной установке применены вибровозбудители электродинамического типа, предложенные в работах [6, 8–10]. Исследования показали, что частотные свойства вибровозбудите-

ля такого типа нелинейны, особенно в области частот основного резонанса. Для увеличения частотной линейности и снижения влияния ОИ на передаточную функцию вибровозбудителя был использован метод ЭМОС, на основе которого разработана новая конструкция электродинамического вибровозбудителя, представленная на рис. 3.

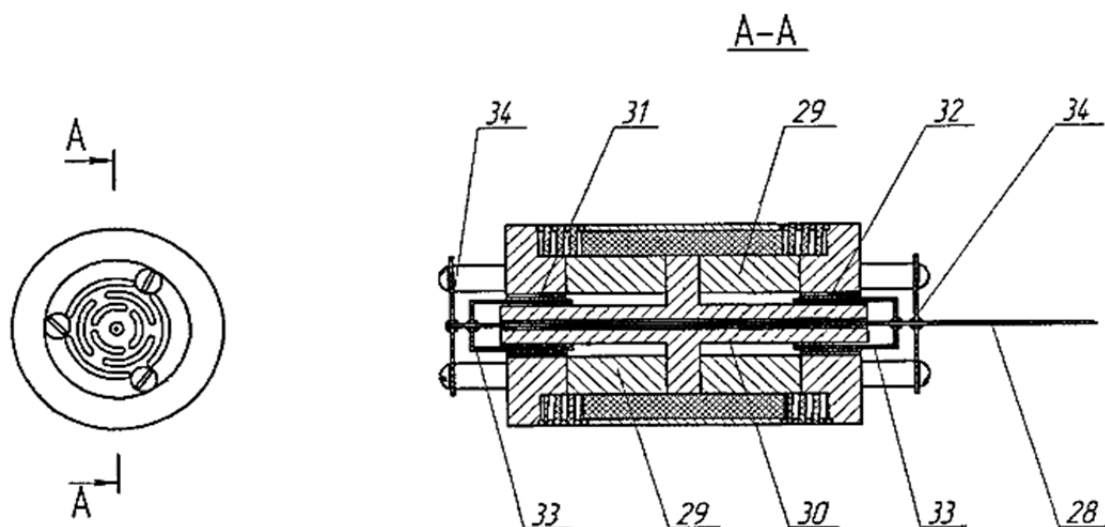


Рис. 3. Конструкция электродинамического вибровозбудителя

Конструкция состоит из магнитной и подвижной систем. Магнитная система состоит из двух постоянных магнитов 29 и магнитопровода 30 с воздушными зазорами. Подвижная система состоит из двух катушек медного провода 31, 32, намотанных на бумажных каркасах 33, подвесов подвижной системы 34, стержневого толкателя 28 для передачи вибровоздействия. Измерительная обмотка 31 находится на одном каркасе с возбуждающей обмоткой 32 и таким образом является частью единой подвижной системы датчика. Использование сигнала ЭМОС позволяет значительно снизить частотное искажение и, как следствие, общую погрешность измерения.

Отличительной особенностью используемых вибропреобразователей в данной установке является их внешнее закрепление по отношению в ОИ, что способствует снижению влияния массы и упругости подвижной системы на точность измерения.

С учетом этих особенностей в установке используется сравнительный метод измерения, основанный на оценке изменения значения параметра вибрации по сравнению с предварительно установленным эталонным значением в установившемся режиме работы эталонного звена вибровозбудитель – виброприемник, работающих непосредственно друг на друга.

Таким образом, при определении резонансных частот объекта частотные нелинейности преобразователей взаимно вычитаются, не оказывая влияния на величину вибрации. Процесс измерений возможно проводить как в ручном, так и в автоматизированном режиме. Однако использование технологий «виртуальных приборов» на сегодняшний день является оптимальной формой экспериментирования.

Для получения наиболее точной картины частотного спектра возможно использование нескольких вибровозбудителей либо возбуждение колебаний поочередно в нескольких скалярных каналах. Кроме того, для элементов сложного сечения возможна модернизация по приему виброскорости не только в разных каналах, но и в разных направлениях. Для определения форм собственных колебаний необходимо, последовательно устанавливая датчик на интересующих участках поверхности, произвести измерение амплитуды вибрации и фазы колебаний. Избавиться от субъективизма и ошибок лаборантов можно путем установки нескольких вибропреобразователей либо оснащением установки устройством автоматического перемещения по оси ОИ, тем самым значительно сокращая время процесса исследования.

На экспериментальном варианте установки (рис. 4) были проведены исследования по определению первых трех резонансных частот стержневого элемента – стального стержня

длиной $l = 180$ мм. Сечение стержня – квадрат со стороной $b = 3$ мм. Модуль упругости материала стержня $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Н/м², плотность материала $\rho = 7800$ кг/м³.

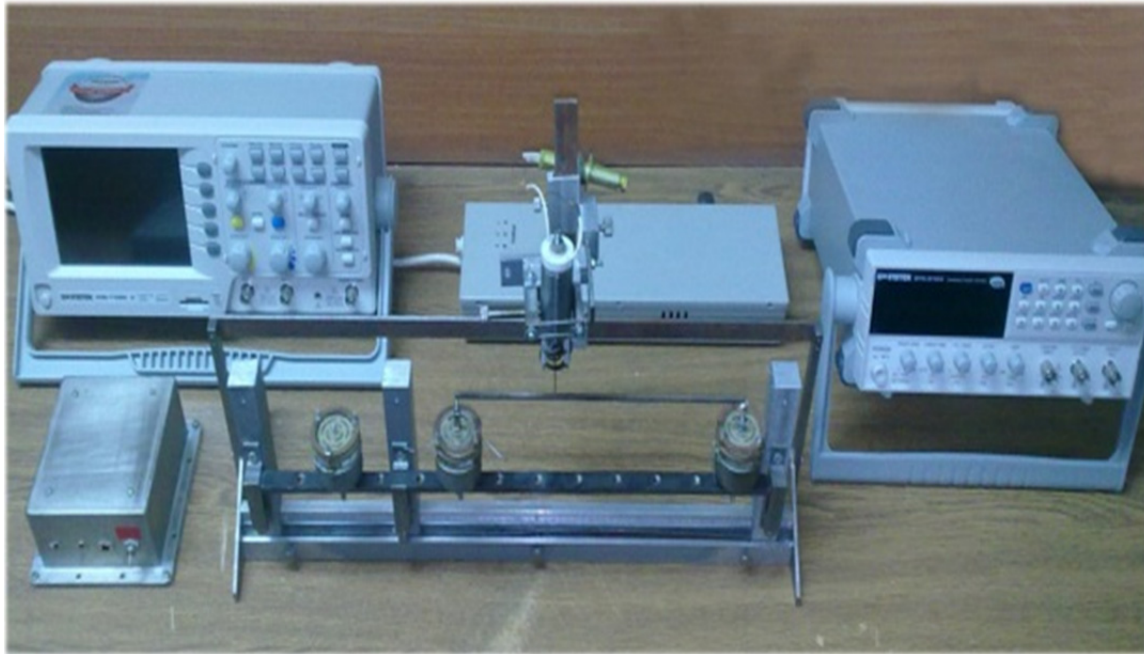


Рис. 4. Экспериментальный вариант лабораторной установки

С помощью формулы для расчета собственной частоты изгибных колебаний шарнирно закрепленного стержня

$$\omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{I_y E}{\rho S}},$$

где I_y – момент инерции сечения, для данной задачи равный $6,75 \cdot 10^{-12}$ м⁴; S – площадь поперечного сечения равная $9 \cdot 10^{-6}$ м², определены три первые резонансные частоты, Гц.

Первая резонансная частота:

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = 217.$$

Вторая резонансная частота:

$$f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi} = 871.$$

Третья резонансная частота:

$$f_3 = \frac{\omega_3}{2\pi} = 1959.$$

В ходе эксперимента были определены три резонансные частоты исследуемого стержня, первая из которых равна 270 Гц, вторая – 740 Гц и третья – 1500 Гц.

Выводы

Полученные данные дают основание считать, что предложенная установка позволяет определять спектральные колебательные характеристики конструктивных элементов РЭС (стержней, пластин, оболочек), на основе которых можно проводить оценку надежности электронного средства на этапе проектирования. Особенностью данной установки является воз-

возможность исследования вибрации в местах крепления конструктивного элемента, что дает возможность исследовать взаимное влияние элемента и основания, а также оценить демпфирующие свойства различных крепежных элементов.

Библиографический список

1. Лысенко, А. В. Методика моделирования влияния внешних механических воздействий на динамические параметры РЭА в среде MATHCAD / А. В. Лысенко // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-1. – С. 68–69.
2. Гришко, А. К. Анализ применения методов и положений теории статистических решений и теории векторного синтеза для задач структурно-параметрической оптимизации / А. К. Гришко // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 26–34. DOI: 10.21685/2307-4205-2016-4-4.
3. Лысенко, А. В. Алгоритм формирования сигналов обратной связи для информационно-измерительной системы управления активной виброзащитой РЭУ / А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, Т. А. Шаркунова // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 3 (7). – С. 50–56.
4. 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.
5. Гришко, А. К. Оптимальное управление параметрами системы радиоэлектронных средств на основе анализа динамики состояний в условиях конфликта / А. К. Гришко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 102–111. DOI: 10.21685/2072-3059-2016-2-9.
6. Функциональная модель информационной технологии обеспечения надежности сложных электронных систем с учетом внешних воздействий / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 184–187.
7. Гришко, А. К. Анализ надежности сложной системы на основе динамики вероятности отказов подсистем и девиации параметров / А. К. Гришко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2016. – № 6 (34). – С. 116–121.
8. Голушко, Д. А. О скорости изменения частоты при проведении испытаний для определения динамических характеристик конструкции / Д. А. Голушко, А. В. Затылкин, А. В. Лысенко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 4 (26). – С. 147–154.
9. 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.
10. Grishko, A. K. Multi-criteria Optimization of the Structure of Radio-electronic System in Indeterminate Conditions / A. K. Grishko, I. I. Kochegarov, N. V. Goryachev // XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). (St. Petersburg, Russia, May 24–26, 2017). – St. Petersburg, 2017. – P. 210–212. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970540.
11. Contactless Three-Component Measurement of Mirror Antenna Vibrations / A. Grigor'ev, A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov, A. Mischev // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). (Moscow, Russia, May 12–14, 2016). – Moscow, 2016. – P. 1–5. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491673.
12. Головин, П. Д. Применение метода квазиобразцового интервала времени для раздельного измерения параметров параметрических датчиков / П. Д. Головин, А. В. Лысенко, Н. К. Юрков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 4. – С. 149–157.
13. Grishko, A. Structural and Parameter Optimization of the System of Interconnected Processes of Building Complex Radio-Electronic Devices / A. Grishko, I. Kochegarov, N. Yurkov // 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM) (Ukraine, February 21–25, 2017). – Polyana, Svalyava, (Zakarpattya), 2017. – P. 192–194. DOI: 10.1109/CADSM.2017.7916112.
14. Гришко, А. К. Анализ надежности структурных элементов сложной системы с учетом интенсивности отказов и параметрической девиации / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 3 (19). – С. 130–137.
15. Пат. 2536325 Российская Федерация. Способ определения спектральных колебательных характеристик конструктивных элементов РЭС и установка для его реализации /

- Голушко Г. Д., Затылкин А. В., Лысенко А. В., Таньков Г. В., Юрков Н. К. ; опубл. 20.12.2014 ; Бюл. № 35.
16. Гришко, А. К. Алгоритм поддержки принятия решений в многокритериальных задачах оптимального выбора / А. К. Гришко // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 1 (17). – С. 242–248.
 17. Study Algorithm Speed Signal Generating Feedback for Information-measuring System Control Active Vibration Protection Red / P. Bushmelev, A. Pivkin, B. Kuatov, A. Lysenko, S. Zatytkin // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, iss. 23. – P. 43831–43834.
 18. Yurkov, N. K. On the Problem of Experimental Research of Forced Vibrations of Plates / N. K. Yurkov, G. V. Tankov, A. V. Lysenko, V. A. Trusov // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM 2016). (St. Petersburg, Russia, July 22, 2016). – St. Petersburg, 2016. – P. 416–418. DOI: 10.1109/SCM.2016.7519798.

Лысенко Алексей Владимирович

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

Lysenko Aleksey Vladimirovich

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

Калашников Владимир Сергеевич

преподаватель,
кафедра эксплуатации радиоэлектронного
оборудования,
Военный институт Сил воздушной обороны
Республики Казахстан им. Т. Я. Бегельдинова
(Казахстан, г. Актобе, пр. А. Молдагуловой, 16)
E-mail: kalashnikov_vs@mail.ru

Kalashnikov Vladimir Sergeevich

lecturer,
sub-department of operation electronic equipment,
Military Institute of air defence Forces
of the Republic of Kazakhstan named T. Y. Begeldinov
(16 A. Moldagulova pr., Aktobe, Kazakhstan)

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)

Горячев Николай Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ra4foc@yandex.ru

Goryachev Nikolay Vladimirovich

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

Подсякин Андрей Сергеевич

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

Podsyakin Andrey Sergeevich

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

УДК 62-1-9

Установка мониторинга динамических параметров элементов конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры / А. В. Лысенко, В. С. Калашников, А. К. Гришко, Н. В. Горячев, А. С. Подсякин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 84–92.
DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-12.