ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Гришко А. К. МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ	
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ	5
Горячев В. Я., Бростилова Т. Ю., Михайлов С. А.,	
<i>Тихомирова А. А., Бростилов С. А.</i> проблемы оптимизации систем электроснабжения	13
ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ	
Перов А. В. МОДЕРНИЗАЦИЯ СТЕНДА ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ И УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ ТЕМП-2	22
Ревунов М. С. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КРОССКОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПУТЕМ ЭКВАЛИЗАЦИИ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ	30
Абрамов С.В., Ульянин Н.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ НЕПОЛНОЙ КОМПЕНСАЦИИ НЕИНФОРМАТИВНОГО ПАРАМЕТРА	38
Медведева С. Н., Чернецов В. И., Чернецов М. В. ОТОБРАЖЕНИЯ ТИПОВЫХ СТРУКТУР ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ В СТРУКТУРЫ ОБОБЩЕННЫХ СИГНАЛЬНЫХ ГРАФОВ	45

=

 $N^{0} 2 (28), 2019$

Кикот В. В., Чебурахин И. Н., Кошкин Г. А., Волков В. С., Андреев В. Г. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ С ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ БЕССВИНЦОВОЙ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ

Гудков К. В., Пискаев К. Ю., Тюрин М. В., Ярославцева Д. А. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ

Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Полосин В. Г., Убиенных А. Г. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОНТРОЛИРУЕМОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭНТРОПИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КВАНТА

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Печерская Е. А., Голубков П. Е., Карпанин О. В., Артамонов Д. В., Бибарсова А. М., Лысенко А. В. АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СИНТЕЗА ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Пауткин В. Е. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНОДНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Печерская Е. А., Голубков П. Е., Карпанин О. В., Козлов Г. В., Печерский А. В. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЯЕМОГО СИНТЕЗА ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ 76 85 94

99

56

64

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL			
Scientific-production journal			
CONTENT			
INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS			

Grishko A. K. MARKOV MODEL FOR PREDICTING THE PARAMETRIC RELIABILITY OF ELECTRONIC SYSTEMS Goryachev V. Ya., Brostilova T. Yu., Mikhaylov S. A., Tikhomirova A. A., Brostilov S. A. PROBLEMS OF OPTIMIZATION OF SYSTEMS ELECTROSUPPLIES

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

Perov A. V.	
IMPROVEMENT OF THE TEMP-2 STAND	
OF ACCELERATIONS AND RATE	22
Revunov M. S.	
EQUALIZATION OF THE IMAGE TO IMPROVE	
CROSS-CORRELATION MEASUREMENT METHOD	30
Abramov S. V., Ul'yanin N. S.	
STUDY OF THE INFLUENCE OF THE TEMPERATURE ERROR	
OF EDDY CURRENT DISPLACEMENT TRANSDUCER TAKING	
INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF INCOMPLETE	
COMPENSATION OF THE UNINFORMATIVE PARAMETER	38
Medvedeva S. N., Chernetsov V. I., Chernetsov M. V.	
DISPLAY TYPICAL STRUCTURES OF MEASUREMENT CIRCUITS	
IN THE STRUCTURE OF THE GENERALIZED SIGNAL GRAPHS	45

45

5

13

 $N^{0} 2 (28), 2019$

Kikot V. V., Cheburakhin I. N., Koshkin G. A., Volkov V. S., Andreev V. G. HIGH-TEMPERATURE PIEZOELECTRIC PRESSURE SENSOR WITH IMPROVED SENSITIVITY BASED ON LEAD-FREE POWER-CERAMICS

Gudkov K. V., Piskaev K. Yu., Tyurin M. V., Yaroslavtseva D. A. SIMULATION MODELING FOR COMPONENTS OF DATA-MEASURING SYSTEMS FOR FLUID FLOW CONTROL

Bezborodova O. E., Bodin O. N., Polosin V. G., Ubiennykh A. G. CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE CONTROLLED OBJECT BASED ON THE ANALYSIS OF THE ENTROPY OF THE DISTRIBUTION OF INFORMATION-MEASURING QUANTUM

TECHNOLOGY INSTRUMENTATION

Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Artamonov D. V., Bibarsova A. M., Lysenko A. V. THE ALGORITHM OF FUNCTIONING OF THE INTELLECTUAL SYSTEM SYNTHESIS OF OXIDE COATINGS

Pautkin V. E. PHYSICAL AND CHEMICAL BASES OF THE ANODE COMPOUND OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS ELEMENTS

Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Kozlov G. V., Pecherskiy A. V. INTELLECTUAL SYSTEM OF CONTROLLED SYNTHESIS OF OXIDE COATINGS

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 519.718: 519.21

DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-1

А.К.Гришко

МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

A. K. Grishko

MARKOV MODEL FOR PREDICTING THE PARAMETRIC RELIABILITY OF ELECTRONIC SYSTEMS

Аннотация. Актуальность и цели. Техническое состояние радиоэлектронных систем зависит от множества параметров, которые в процессе эксплуатации изменяются, что может привести к потере работоспособности системы, дополнительным расходам на регламентные работы или ремонт. Сокращение расходов на эксплуатацию радиоэлектронных систем при обеспечении требуемого качества их функционирования является актуальной задачей и требует совершенствования методов прогнозирования их технического состояния. Целью работы является построение модели прогнозирования изменения параметров радиоэлектронной системы в процессе эксплуатации. Материалы и методы. Модель прогнозирования технического состояния формировалась на основе теории цепей Маркова, в частности, был использован Марковский ветвящийся процесс. Для определения стохастических характеристик модели применен математический аппарат производящих функций. Результаты. Получена стохастическая модель параметрического прогнозирования надежности радиоэлектронных систем, имеющая в отличие от других подходов, аналитические решения системы дифференциальных уравнений. Выводы. Модель предложено использовать для прогнозирования параметрической надежности и технического состояния радиоэлектронных систем в зависимости от времени эксплуатации. При модульном проектировании модель позволяет осуществлять выбор перспективных модулей радиоэлектронных средств с учетом их вероятностных характеристик надежности.

A b s t r a c t. *Background*. The technical condition of radio-electronic systems depends on a variety of parameters that change during operation, which can lead to loss of system performance, additional costs for maintenance or repair. Reducing the cost of operating electronic systems while ensuring the required quality of their operation is an urgent task and requires the improvement of methods for predicting their technical condition. The aim of the work is to construct a model for predicting changes in the parameters of an electronic system during operation. *Materials and methods*. A model of forecasting the technical condition was formed on the basis of the theory of Markov chains; in particular, the Markov branching process was used. To determine the stochastic characteristics of the model, the mathematical apparatus of generating functions is applied. **Results**. A stochastic model of parametric prediction of the reliability of radio-electronic systems was obtained, which, unlike the use of other approaches, has analytical solutions of a system of differential equations. **Conclusions**. The model is proposed to be used to predict the parametric reliability and technical condition of electronic systems, depending on the time of operation. In modular design, the model allows the selection of promising modules of radio electronic means, taking into account their probabilistic reliability characteristics.

Ключевые слова: радиоэлектронная система, Марковская цепь, надежность, параметры, группа деградации, интенсивность перехода.

K e y w o r d s: radio electronic system, Markov chain, reliability, parameters, degradation group, transition intensity.

Введение

Радиоэлектронные системы (РЭС) имеют сложную иерархическую структуру, а уровень их надежности и техническое состояние (ТС) характеризуются и зависят от множества параметров (мощность, амплитуда и частота сигнала, фазовый сдвиг, коэффициент передачи, температурные и вибрационные характеристики и т.д.). При выходе хотя бы одного такого параза установленные границы допуска наступает параметрический отказ, метра И радиоэлектронная аппаратура считается неисправной и подлежит регулировке или замене. Обеспечение надежности радиоэлектронных систем зависит от своевременного контроля параметров РЭС, диагностики ТС, по результатам чего определяется необходимый вид технического обслуживания РЭС, который проводится с целью предупреждения внезапных и постепенных отказов. Сокращение расходов на эксплуатацию РЭС при обеспечении высокого качества их функционирования является актуальной задачей и требует для своего решения знания закономерностей поведения и изменения ТС параметров и особенностей функционирования отдельных блоков РЭС, на основе чего формируется методология прогнозирования надежности РЭС [1-4]. Математический аппарат цепей Маркова можно применять в качестве одного из подходов к описанию поведения РЭС в процессе эксплуатации.

Постановка задачи

Период эксплуатации РЭС как этап жизненного цикла сложной системы характеризуется деградационными процессами (расстройка, разрегулирование, износ контактов, старение элементной базы, коррозия и т.д.), которые приводят в какой-то момент времени к потере работоспособности РЭС. Поскольку эти процессы являются случайными и необратимыми, то вполне естественно прогнозирование деградации «старения» радиоэлектронной системы описывать на основе стохастических процессов [5–7]. Марковские цепи описывают последовательность состояний системы, в каждое из которых она может попасть независимо от предшествующего состояния, а все возможные состояния системы образуют полную группу несовместных событий. Как правило, марковская цепь описывает переходные режимы рассматриваемой системы через одинаковые интервалы времени, что позволяет использовать ее для анализа поведения системы в течение всего периода эксплуатации. Задача прогнозирования надежности РЭС будет состоять в том, чтобы, анализируя динамику изменения параметров, построить математическую модель, позволяющую оценивать количественные показатели надежности и технического состояния РЭС.

Построение модели деградации РЭС

В процессе решения проблемы параметрической надежности РЭС возникает некоторая неправомерность основного положения классической теории надежности: постоянство во времени интенсивности отказов. Это связано с тем, что она (теория) рассматривает, как правило, изделия, принимающие работоспособное и неработоспособное состояния. Постепенное изменение (дрейф) параметров РЭС в реальности происходит не только по линейному или экспоненциальному законам, но и по другим видам зависимостей, в том числе нелинейным. Из этого следует, что у рассматриваемой РЭС может быть множество работоспособных состо-

яний, имеющих свои уровни эффективности функционирования, которые определяются степенью деградации ее параметров.

Деградационный процесс приближения радиоэлектронной системы к состоянию отказа целесообразно рассматривать, как случайный процесс изменения значений ее параметров, стремящихся к границе многомерной рабочей области. При проведении исследований дрейфа параметров РЭС их принято условно разбивать на группы для удобства изучения. Если процесс изменения технического состояния радиоэлектронной аппаратуры от времени эксплуатации условно разбить на группы деградации, то каждая группа будет характеризоваться определенным значением параметров РЭС. С увеличением номера группы повышается степень деградации радиоэлектронной системы и приближение технических параметров к своим расчетным предельным значениям. Количество этих групп параметров может быть достаточно большим и ограничивается только числом технических параметров m и самой целесообразностью разбиения.

В теории надежности и особенно ее практических приложениях акцент в исследованиях делают на характерных этапах жизненного цикла РЭС, поскольку важно различать и контролировать состояния системы, отвечающие крайним или допустимым (граничным) значениям технических характеристик. Такими являются, например, ввод в эксплуатацию, основной эксплуатационный период, предотказный период и состояние отказа.

Допустим, РЭС имеет *m* технических параметров, которые соответствуют определенным значениям. Период, когда РЭС находится в работоспособном состоянии, предлагается разбивать на три группы, параметры имеют допустимые значения, а четвертая группа соответствует неработоспособному состоянию РЭС, так как ее параметры вышли за установленные пределы допуска (рис. 1). Причем в первую группу будут входить параметры с номинальными значениями, вторая группа параметров имеет средние отклонения от своих номинальных значений, а третья группа содержит параметры, имеющие предельные отклонения от номиналов.



Рис. 1. Марковская цепь прогнозирования изменения параметров РЭС

Количество технических параметров, входящих в каждую из четырех групп, является величиной случайной: $\mu_1(t) = m_1$, $\mu_2(t) = m_2$, $\mu_3(t) = m_3$, $\mu_4(t) = m_4$ и их число в группах изменяется со временем эксплуатации, причем $m_1 = 0, 1, 2, ..., m$, $m_2 = 0, 1, 2, ..., m$, $m_3 = 0, 1, 2, ..., m$, $m_4 = 0, 1, 2, ..., m$. При переходе параметров из первой группы во вторую, а из второй в третью РЭС сохраняет работоспособность. При переходе хотя бы одного параметра в четвертую группу наступает параметрический отказ оборудования [8, 9].

Изменение технических параметров устройства в расчетной схеме моделируется следующим образом. За время $\Delta t(\Delta t \rightarrow 0)$ с вероятностью $P_{i,i+1}(\Delta t) = m_i \lambda_{i,i+1} \Delta t$ (i = 1, 2, 3, n - 1) параметр *i*-й группы переходит в *i*+1-ю группу за счет деградации элементной базы аппаратуры. Это значит в *i*-й группе число параметров становится на один меньше, а *i*+1-й группе становится на один больше. Вероятности переходов $P_{i,i+1}$, *i*=1, 2, 3, ..., *n*-1 зависят от постоянных интенсивности переходов $\lambda_{i,i+1}$ и от количества параметров в группе деградации, т.е. значение вероятности перехода РЭС из одного состояние в другое тем выше, чем больше число характеристик в группе.

Далее определяем значение вероятности $P_{m_1,m_2,m_3,m_4}(t) = P(t; \mathbf{\mu}_1(t) = m_1, \mathbf{\mu}_2(t) = m_2, \mathbf{\mu}_3(t) = m_3, \mathbf{\mu}_4(t) = m_4)$ – вероятности того, что в некоторый произвольный момент времени t 1-я группа будет содержать m_1 параметров, 2-я группа – m_2 , 3-я группа – m_3 , 4-я группа – m_4 .

 $P_{m_1,m_2,m_3,m_4}(t)$ находим исходя из расчетной схемы прогнозирования изменения параметров РЭС [10], построенной на основе марковского процесса, который является ветвящимся (рис. 2).



Рис. 2. Структура вероятностных переходов Марковского процесса прогнозирования изменения параметров РЭС

Построение системы дифференциальных уравнений

При построении системы линейных дифференциальных уравнений, которая описывает Марковский процесс, необходимо учитывать, что ее порядок напрямую зависит от числа состояний стохастической системы. Ветвящиеся марковские процессы характеризуются резким увеличением таких состояний при увеличении числа групп деградации и количества параметров. Например, реальные РЭС имеют до десятков и сотен тысяч состояний, что чрезвычайно усложняет решение системы дифференциальных уравнений численными методами.

В такой ситуации ветвящиеся марковские процессы имеют серьезное преимущество, поскольку построенные на основе них системы линейных обыкновенных дифференциальных уравнений имеют аналитические решения.

Достигнуто это за счет применения математического аппарата производящих функций [11], которое дало возможность преобразовать систему обыкновенных дифференциальных уравнений в линейное дифференциальное уравнение в частных производных первого порядка.

Учитывая структуру марковских переходов, составляем систему обыкновенных дифференциальных уравнений [4, 12]:

$$\frac{dP(t; \mathbf{\mu}_{1}(t) = m_{1}, \mathbf{\mu}_{2}(t) = m_{2}, \mathbf{\mu}_{3}(t) = m_{3}, \mathbf{\mu}_{4}(t) = m_{4})}{dt} = -m_{1}\mathbf{\mu}_{12}P(t; \mathbf{\mu}_{1}(t) = m_{1}, \mathbf{\mu}_{2}(t) = m_{2}, \mathbf{\mu}_{3}(t) = m_{3}, \mathbf{\mu}_{4}(t) = m_{4}) + (m_{1}+1)(\boldsymbol{\lambda}_{12}P(t; \mathbf{\mu}_{1}(t) = m_{1}+1, \mathbf{\mu}_{2}(t) = m_{2}-1, \mathbf{\mu}_{3}(t) = m_{3}, \mathbf{\mu}_{4}(t) = m_{4}) - -m_{2}\boldsymbol{\lambda}_{23}P(t; \mathbf{\mu}_{1}(t) = m_{1}, \mathbf{\mu}_{2}(t) = m_{2}, \mathbf{\mu}_{3}(t) = m_{3}, \mathbf{\mu}_{4}(t) = m_{4}) + (m_{2}+1)(\boldsymbol{\lambda}_{23}P(t; \mathbf{\mu}_{1}(t) = m_{1}, \mathbf{\mu}_{2}(t) = m_{2}+1, \mathbf{\mu}_{3}(t) = m_{3}-1, \mathbf{\mu}_{4}(t) = m_{4}) - -m_{2}\boldsymbol{\lambda}_{23}P(t; \mathbf{\mu}_{1}(t) = m_{1}, \mathbf{\mu}_{2}(t) = m_{2}, \mathbf{\mu}_{3}(t) = m_{3}, \mathbf{\mu}_{4}(t) = m_{4}) + (m_{2}+1)(\boldsymbol{\lambda}_{23}P(t; \mathbf{\mu}_{1}(t) = m_{1}, \mathbf{\mu}_{2}(t) = m_{2}, \mathbf{\mu}_{3}(t) = m_{3}, \mathbf{\mu}_{4}(t) = m_{4}) + (m_{2}+1)(\boldsymbol{\lambda}_{23}P(t; \mathbf{\mu}_{1}(t) = m_{1}, \mathbf{\mu}_{2}(t) = m_{2}, \mathbf{\mu}_{3}(t) = m_{3}+1, \mathbf{\mu}_{4}(t) = m_{4}-1),$$

Начальные условия решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1) определяем, учитывая начальные состояния стохастической системы $\mu_0 = (\mu_1(0) = m_1^0, m_1^0)$

Measuring. Monitoring. Management. Control

 $\mu_2(0) = m_2^0$, $\mu_3(0) = m_3^0$, $\mu_4(0) = m_4^0$). В начальный момент времени t = 0 1-я группа содержит m_1^0 параметров, 2-я группа содержит m_2^0 , 3-я группа содержит m_3^0 , 4-я группе содержит m_4^0 . На основе этого получаем следующее выражение:

$$P(0; \boldsymbol{\mu}_{1}(0) = m_{1}, \boldsymbol{\mu}_{2}(0) = m_{2}, \boldsymbol{\mu}_{3}(0) = m_{3}, \boldsymbol{\mu}_{4}(0) = m_{4}) =$$

$$= \begin{cases} 1, \text{ если } m_{1} = m_{1}^{0}, m_{2} = m_{2}^{0}, m_{3} = m_{3}^{0}, m_{4} = m_{4}^{0}, \\ 0, \text{ если } m_{1} \neq m_{1}^{0}, m_{2} \neq m_{2}^{0}, m_{3} \neq m_{3}^{0}, m_{4} \neq m_{4}^{0}. \end{cases}$$

$$(2)$$

Таким образом, задавая для системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1) начальные условия (2), получаем стохастическую математическую модель прогнозирования изменения параметров РЭС в зависимости от времени эксплуатации. Применяя метод Рунге – Кутта, решаем систему (2) и находим значения $P_{m_1,m_2,m_3}(t) = P(t;\mu_1(t) = m_1, \mu_2(t) = m_2, \mu_3(t) = m_3, \mu_4(t) = m_4)$.

Стохастические характеристики изменения значений параметров

Из вероятностей $P_{m_1,m_2,m_3,m_4}(t)$ можно получить другие стохастические характеристики изменения значений технических параметров от времени эксплуатации. Преобразуем систему обыкновенных дифференциальных уравнений в дифференциальное уравнение в частных производных с помощью производящей функции, выражение для которой имеет следующий вид [1, 2, 4]:

$$F(t; x_1, x_2, x_3, x_4) = \sum_{m_1=0}^{m} \sum_{m_2=0}^{m} \sum_{m_3=0}^{m} \sum_{m_4=0}^{m} x_1^{m_1} x_2^{m_2} x_3^{m_3} x_4^{m_4} P(t; \boldsymbol{\mu}_1(t) = m_1, \boldsymbol{\mu}_2(t) = m_2, \boldsymbol{\mu}_3(t) = m_3, \boldsymbol{\mu}_4(t) = m_4), \quad (3)$$

где x_1, x_2, x_3, x_4 – величины, являющиеся переменными.

После дифференцирования производящей функции $F(t; x_1, x_2, x_3, x_4)$ по каждой переменной t, x_1, x_2, x_3, x_4 получим следующие выражения:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \sum_{m_{1}=0}^{m} \sum_{m_{2}=0}^{m} \sum_{m_{3}=0}^{m} \sum_{m_{4}=0}^{m} x_{1}^{m_{1}} x_{2}^{m_{2}} x_{3}^{m_{3}} x_{4}^{m_{4}} \frac{dP(t; \boldsymbol{\mu}_{1}(t) = m_{1}, \boldsymbol{\mu}_{2}(t) = m_{2}, \boldsymbol{\mu}_{3}(t) = m_{3}, \boldsymbol{\mu}_{4}(t) = m_{4})}{dt},$$

$$x_{1} \frac{\partial F}{\partial x_{1}} = \sum_{m_{3}=0}^{m} \sum_{m_{1}=0}^{m} \sum_{m_{2}=0}^{m} \sum_{m_{3}=0}^{m} \sum_{m_{4}=0}^{m} m_{1} x_{1}^{m_{1}} x_{2}^{m_{2}} x_{3}^{m_{3}} x_{4}^{m_{4}} P(t; \boldsymbol{\mu}_{1}(t) = m_{1}, \boldsymbol{\mu}_{2}(t) = m_{2}, \boldsymbol{\mu}_{3}(t) = m_{3}, \boldsymbol{\mu}_{4}(t) = m_{4}),$$

$$x_{2} \frac{\partial F}{\partial x_{1}} = \sum_{m_{3}=0}^{m} \sum_{m_{1}=0}^{m} \sum_{m_{2}=0}^{m} \sum_{m_{3}=0}^{m} \sum_{m_{4}=0}^{m} m_{2} x_{1}^{m_{1}} x_{2}^{m_{2}} x_{3}^{m_{3}} x_{4}^{m_{4}} P(t; \boldsymbol{\mu}_{1}(t) = m_{1}, \boldsymbol{\mu}_{2}(t) = m_{2}, \boldsymbol{\mu}_{3}(t) = m_{3}, \boldsymbol{\mu}_{4}(t) = m_{4}),$$

$$x_{3} \frac{\partial F}{\partial x_{1}} = \sum_{m_{3}=0}^{m} \sum_{m_{1}=0}^{m} \sum_{m_{2}=0}^{m} \sum_{m_{3}=0}^{m} \sum_{m_{4}=0}^{m} m_{3} x_{1}^{m_{1}} x_{2}^{m_{2}} x_{3}^{m_{3}} x_{4}^{m_{4}} P(t; \boldsymbol{\mu}_{1}(t) = m_{1}, \boldsymbol{\mu}_{2}(t) = m_{2}, \boldsymbol{\mu}_{3}(t) = m_{3}, \boldsymbol{\mu}_{4}(t) = m_{4}),$$

$$x_{4} \frac{\partial F}{\partial x_{1}} = \sum_{m_{3}=0}^{m} \sum_{m_{1}=0}^{m} \sum_{m_{2}=0}^{m} \sum_{m_{3}=0}^{m} m_{4} x_{1}^{m_{1}} x_{2}^{m_{2}} x_{3}^{m_{3}} x_{4}^{m_{4}} P(t; \boldsymbol{\mu}_{1}(t) = m_{1}, \boldsymbol{\mu}_{2}(t) = m_{2}, \boldsymbol{\mu}_{3}(t) = m_{3}, \boldsymbol{\mu}_{4}(t) = m_{4}),$$

$$x_{2} \frac{\partial F}{\partial x_{1}} = \sum_{m_{3}=0}^{m} \sum_{m_{1}=0}^{m} \sum_{m_{2}=0}^{m} \sum_{m_{3}=0}^{m} m_{4} x_{1}^{m_{1}} x_{2}^{m_{2}} x_{3}^{m_{3}} x_{4}^{m_{4}} P(t; \boldsymbol{\mu}_{1}(t) = m_{1}, \boldsymbol{\mu}_{2}(t) = m_{2}, \boldsymbol{\mu}_{3}(t) = m_{3}, \boldsymbol{\mu}_{4}(t) = m_{4}),$$

$$x_{2} \frac{\partial F}{\partial x_{1}} = \sum_{m_{3}=0}^{m} \sum_{m_{1}=0}^{m} \sum_{m_{2}=0}^{m} \sum_{m_{3}=0}^{m} m_{m_{4}=0}^{m} m_{4} x_{1}^{m_{1}} x_{2}^{m_{2}} x_{3}^{m_{3}} x_{4}^{m_{4}} P(t; \boldsymbol{\mu}_{1}(t) = m_{1} + 1, \boldsymbol{\mu}_{2}(t) = m_{2} - 1, \boldsymbol{\mu}_{3}(t) = m_{3}, \boldsymbol{\mu}_{4}(t) = m_{4}),$$

$$\sum_{m_{1}=0}^{m} m_{1} m_{1} m_{1} m_{1} m_{1} m_{2}^{m_{2}} x_{3}^{m_{3}} x_{4}^{m_{4}} P(t; \boldsymbol{\mu}_{1}(t) = m_{1} + 1, \boldsymbol{\mu}_{2}(t) = m_{2} - 1, \boldsymbol{\mu}_{3}(t) = m_{3}, \boldsymbol{\mu}_{4}(t) = m_{4}),$$

$$x_{3}\frac{\partial F}{\partial x_{2}} = \sum_{m_{3}=0}\sum_{m_{1}=0}\sum_{m_{2}=0}\sum_{m_{3}=0}\sum_{m_{4}=0}\sum_{m_{4}=0}(m_{2}+1)x_{1}^{m_{1}}x_{2}^{m_{2}}x_{3}^{m_{3}}x_{4}^{m_{4}}P(t;\boldsymbol{\mu}_{1}(t)=m_{1},\boldsymbol{\mu}_{2}(t)=m_{2}+1,\boldsymbol{\mu}_{3}(t)=m_{3}-1,\boldsymbol{\mu}_{4}(t)=m_{4}),$$

$$x_{4}\frac{\partial F}{\partial x_{3}} = \sum_{m_{3}=0}^{m}\sum_{m_{1}=0}^{m}\sum_{m_{2}=0}^{m}\sum_{m_{3}=0}^{m}\sum_{m_{4}=0}^{m}(m_{3}+1)x_{1}^{m_{1}}x_{2}^{m_{2}}x_{3}^{m_{3}}x_{4}^{m_{4}}P(t;\boldsymbol{\mu}_{1}(t)=m_{1},\boldsymbol{\mu}_{2}(t)=m_{2},\boldsymbol{\mu}_{3}(t)=m_{3}+1,\boldsymbol{\mu}_{4}(t)=m_{4}-1).$$

Совместное решение выражений (3) и (4) относительно производящей функции приводит к дифференциальному уравнению в частных производных [3, 4]:

Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

$$\lambda_{12}(x_2 - x_1)\frac{\partial F}{\partial x_1} + \lambda_{23}(x_3 - x_2)\frac{\partial F}{\partial x_2} + \lambda_{34}(x_4 - x_3)\frac{\partial F}{\partial x_3} - \frac{\partial F}{\partial t} = 0.$$
 (5)

Вероятность распределения параметров по группам деградации

Уравнение (5) имеет аналитическое решение, из которого для случая $\mu_1(0) = m_1^0 (m_1^0 = m)$, $\mu_2(0) = 0$, $\mu_3(0) = 0$, $\mu_4(0) = 0$ (все параметры РЭС в начальный момент эксплуатации не выходят за пределы номинальных значений и находятся в первой группе) определено значение вероятности распределения параметров по группам деградации:

$$P(t;m_1,m_2,m_3,m_4) = \frac{m_1^{0!}}{m_1!m_2!m_3!m_4!(m_1^{0}-m_1-m_2-m_3-m_4)!} \times \left[\exp(-\lambda_{12}t)\right]^{m_1} \left[\exp(-\lambda_{23}t) - \exp(-\lambda_{12}t)\right]^{m_2} \times \left[\exp(-\lambda_{34}t) - \exp(-\lambda_{23}t)\right]^{m_3} \left[1 - \exp(-\lambda_{34}t)\right]^{m_4}.$$
 (6)

Математическое ожидание параметров в группах деградации:

$$M_{1}(\mathbf{\mu}_{1}(t) = m_{1}) = m_{1}^{0} \exp(-\lambda_{12} t),$$

$$M_{2}(\mathbf{\mu}_{2}(t) = m_{2}) = m_{1}^{0} (\exp(-\lambda_{23} t) - \exp(-\lambda_{12} t)),$$

$$M_{3}(\mathbf{\mu}_{3}(t) = m_{3}) = m_{1}^{0} (\exp(-\lambda_{34} t) - \exp(-\lambda_{23} t)),$$

$$M_{4}(\mathbf{\mu}_{4}(t) = m_{4}) = m_{1}^{0} (1 - \exp(-\lambda_{34} t)).$$
(7)

Дисперсия параметров в группах деградации:

$$D_{1}(\boldsymbol{\mu}_{1}(t) = m_{1}) = M_{1}(\boldsymbol{\mu}_{1}(t) = m_{1}) - \frac{1}{m_{1}^{0}} M_{1}^{2}(\boldsymbol{\mu}_{1}(t) = m_{1}),$$

$$D_{2}(\boldsymbol{\mu}_{2}(t) = m_{2}) = M_{2}(\boldsymbol{\mu}_{2}(t) = m_{2}) - \frac{1}{m_{1}^{0}} M_{2}^{2}(\boldsymbol{\mu}_{2}(t) = m_{2}),$$

$$D_{3}(\boldsymbol{\mu}_{3}(t) = m_{3}) = M_{3}(\boldsymbol{\mu}_{3}(t) = m_{3}) - \frac{1}{m_{1}^{0}} M_{3}^{2}(\boldsymbol{\mu}_{3}(t) = m_{3}),$$

$$D_{4}(\boldsymbol{\mu}_{4}(t) = m_{4}) = M_{4}(\boldsymbol{\mu}_{4}(t) = m_{4}) - \frac{1}{m_{1}^{0}} M_{4}^{2}(\boldsymbol{\mu}_{4}(t) = m_{4}).$$
(8)

Выводы

Математические выражения для закона распределения случайных величин (6), математического ожидания (7) и дисперсии (8) составляют стохастическую модель для прогнозирования изменения состояния технических параметров РЭС в зависимости от времени эксплуатации. Рассмотренные в выражениях (6), (7) постоянные интенсивности переходов λ_{12} , λ_{23} , λ_{34} марковского процесса являются величинами неизвестными и могут быть определены опытным путем на позднем этапе проектирования аппаратуры, когда уже разработаны и созданы экспериментальные образцы и требуется их доработка. РЭС обычно имеет модульную структуру, включающую электронные блоки, которые проектировщики будут включать в конструкции перспективных радиоэлектронных систем. Это позволяет вероятностные характеристики надежности этих модулей учитывать при вычислении постоянных интенсивности переходов.

Заключение

Предложенная в данной статье стохастическая модель изменения состояния технических параметров посредством определения постоянных интенсивностей переходов λ позволяет учитывать несколько работоспособных состояний РЭС с различным уровнем эффективно-

Measuring. Monitoring. Management. Control

сти, прогнозировать изменения технического состояния РЭС в зависимости от времени эксплуатации и параметрической надежности в период его длительного хранения.

Библиографический список

- 1. *Черноруцкий, И. Г.* Методы принятия решений / И. Г. Черноруцкий. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
- 2. Вентцель, Е. С. Теория вероятности / Е. С. Вентцель. Москва : Наука, 2005. 576 с.
- 3. 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.
- 4. Севостьянов, Б. А. Ветвящиеся процессы. Теория вероятностей и математическая статистика / Б. А. Севостьянов. Москва : Наука, 1971. 436 с.
- 5. *Юрков, Н. К.* Моделирование оценки риска при отказе электронных средств длительного функционирования / Н. К. Юрков, И. И. Кочегаров, Н. В. Горячев // Проектирование и технология электронных средств. 2014. № 4. С. 36–41.
- *Гришко, А. К.* Построение эффективной системы радиоэлектронных средств на основе анализа полумарковской модели обеспечения электромагнитной совместимости / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Проектирование и технология электронных средств. 2017. № 4. С. 18–25.
- Гришко, А. К. Прогнозирование и оптимизация управления процессов проектирования сложных технических систем в масштабе реального времени / А. К. Гришко, А. В. Лысенко, С. А. Моисеев // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 1 (21). С. 40–45. DOI 10.21685/2307-4205-2018-1-5.
- 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.
- Time Factor in the Theory of Anthropogenic Risk Prediction in Complex Dynamic Systems / V. A. Ostreikovsky, Ye. N. Shevchenko, N. K. Yurkov, I. I. Kochegarov, A. K. Grishko // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 944, iss. 1. – P. 1–10. – DOI 10.1088/1742-6596/944/1/012085.
- Lysenko, A. V. Optimizing structure of complex technical system by heterogeneous vector criterion in interval form / A. V. Lysenko, I. I. Kochegarov, N. K. Yurkov, A. K. Grishko // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015, iss. 4. – P. 1–6. – DOI 10.1088/1742-6596/1015/4/042032.
- Reliability control of complex systems at different stages of their life cycle / A. Grishko, P. Adnreev, N. Goryachev, V. Trusov, E. Danilova // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). – Yekaterinburg, 2018. – P. 220–223. – DOI 10.1109/USBEREIT.2018.8384589.
- Intellectual Method for Reliability Assessment of Radio-Electronic Means / N. K. Yurkov, A. K. Grishko, A. V. Lysenko, E. A. Danilova, E. A. Kuzina // International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2018). – Saratov, 2018. – P. 105–112. – DOI 10.1109/APEDE.2018.8542360

References

- 1. Chernorutskiy I. G. *Metody prinyatiya resheniy* [Decision-making methods]. Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2005, 416 p. [In Russian]
- 2. Venttsel' E. S. *Teoriya veroyatnosti* [Theory of probability]. Moscow: Nauka, 2005, 576 p. [In Russian]
- 3. Grishko A. K. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, systems, networks in economics, engineering, nature and society]. 2016, no. 3 (19), pp. 130–137. [In Russian]
- 4. Sevost'yanov B. A. *Vetvyashchiesya protsessy. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Branching process. Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Nauka, 1971, 436 p. [In Russian]
- 5. Yurkov N. K., Kochegarov I. I., Goryachev N. V. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv* [Design and technology of electronic means]. 2014, no. 4, pp. 36–41. [In Russian]

Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

- 6. Grishko A. K., Goryachev N. V., Yurkov N. K. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh* sredstv [Design and technology of electronic means]. 2017, no. 4, pp. 18–25. [In Russian]
- Grishko A. K., Lysenko A. V., Moiseev S. A. Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 1 (21), pp. 40–45. DOI 10.21685/ 2307-4205-2018-1-5. [In Russian]
- 8. Grishko A., Goryachev N., Yurkov N. International Journal of Applied Engineering Research. 2015, vol. 10, no. 23, pp. 43842–43845.
- Ostreikovsky V. A., Shevchenko Ye. N., Yurkov N. K., Kochegarov I. I., Grishko A. K. Journal of Physics: Conference Series. 2018, vol. 944, iss. 1, pp. 1–10. DOI 10.1088/1742-6596/944/1/012085.
- Lysenko A. V., Kochegarov I. I., Yurkov N. K., Grishko A. K. Journal of Physics: Conference Series. 2018, vol. 1015, iss. 4, pp. 1–6. DOI 10.1088/1742-6596/1015/4/042032.
- Grishko A., Adnreev P., Goryachev N., Trusov V., Danilova E. Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). Yekaterinburg, 2018, pp. 220–223. DOI 10.1109/USBEREIT.2018.8384589.
- Yurkov N. K., Grishko A. K., Lysenko A. V., Danilova E. A., Kuzina E. A. International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2018). Saratov, 2018, pp. 105–112. DOI 10.1109/APEDE.2018.8542360

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 Alexey Konstantinovich

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

Образец цитирования:

Гришко, А. К. Марковская модель прогнозирования параметрической надежности радиоэлектронных систем / А. К. Гришко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 5–12. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-1.

В. Я. Горячев, Т. Ю. Бростилова, С. А. Михайлов, А. А. Тихомирова, С. А. Бростилов

ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

V. Ya. Goryachev, T. Yu. Brostilova, S. A. Mikhaylov, A. A. Tikhomirova, S. A. Brostilov

PROBLEMS OF OPTIMIZATION OF SYSTEMS ELECTROSUPPLIES

Аннотация. Актуальность и цели. Объектом исследования является система электроснабжения населенных пунктов. Предметом исследования является определение оптимальных мест расположения подстанций соответствующего класса напряжения. Целью работы является рассмотрение путей оптимизации системы электроснабжения сельскохозяйственного района на основе применения метода распределенных удельных мощностей. Материалы и методы. Для определения места расположения источников питания районов малоэтажной застройки использован разработанный авторами метод распределенных удельных мощностей. В качестве критериев оптимизации использована величина потерь на передачу электрической энергии. Результаты. Предложен метод, основанный на том, что каждая нагрузка на поверхности представлена фигурами в виде тел вращения, ограниченных поверхностями, образованными произведением базовой функции на мощность нагрузки. Анализ результатов проводится путем замены группы потребителей эквивалентным потребителем и определением радиуса рассеяния. Рассмотрена методика выбора оптимального места расположения подстанций 10(6)/0,4 кВ и подстанций 110(35)/10(6) кВ. Выводы. Метод распределенных удельных мощностей позволяет спроектировать систему электроснабжения, обладающую лучшими характеристиками по признаку минимальных потерь на передачу электрической энергии. Предложенный метод достаточно универсален и может быть использован при проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий, области в целом и для определения оптимальных мест установки компенсаторов реактивной мощности.

A b s t r a c t. *Background*. The object of research is the power supply system of settlements. The subject of the study is to determine the optimal locations of substations of the corresponding voltage class. The aim of the work is to consider ways to optimize the power supply system of the agricultural area on the basis of the method of distributed specific capacity. *Materials and methods*. For determining the location of power sources in low-rise areas, the authors used the method of distributed specific power. As optimization criteria, the value of losses on transmission of electric energy is used. *Results*. The proposed method is based on the fact that each surface load is represented by figures in the form of bodies of rotation bounded by surfaces formed by the product of the basic function on the load power is proposed. The analysis of the results is carried out by replacing a group of consumers with an equivalent consumer and determining the scattering radiation. The method of choosing the optimal location of 10(6)/0.4 kV substations and 110(35)/10(6) kV substations is considered. *Conclusions*. The method of the distributed specific capacities allows to design the system of power supply possessing the best characteristics on the basis of the minimum losses on transfer of electric en-

© Горячев В. Я., Бростилова Т. Ю., Михайлов С. А., Тихомирова А. А., Бростилов С. А., 2019

ergy. The proposed method is quite universal and can be used in the design of power supply systems of industrial enterprises, the region as a whole and to determine the optimal places of installation of reactive power compensators.

К лючевые слова: электроснабжение населенных пунктов, подстанция, оптимизация, потребитель электрической энергии, потери электроэнергии, место расположения подстанций.

K e y w o r d s: the electricity settlements, substation, optimization, consumers of electricity, loss of electricity, the location of the substations.

Введение

Основным показателем качества системы электроснабжения являются минимальные потери на передачу электрической энергии. Фактором, влияющим на этот показатель, является выбор места расположения питающих подстанций. Вопросу выбора оптимального места расположения цеховых подстанций посвящен ряд работ Каменевой [1, 2]. Речь идет о методе, который получил название «центра масс». Однако возможности предложенной ей методики ограничиваются нахождением оптимального места расположения одной цеховой подстанции. В ряде случаев даже при проектировании систем электроснабжения оптимальным является расположение двух и более подстанций в пределах одного цеха. Критериями оптимальности в этом случае являются или минимальные потери на передачу электрической энергии, или минимальная металлоемкость системы электроснабжения. Не последним критерием оптимальности является и минимальная стоимость работ.

Выбор оптимальных мест расположения цеховых подстанций является частным случаем вопроса выбора подстанций классом 10(6)/0,4 кВ. Это объясняется тем, что условия проектирования систем электроснабжения районов малоэтажной застройки и городских районов с многоэтажными домами отличаются от условий проектирования электроснабжения цехов.

Следует обратить внимание на то, что, кроме подстанций 10(6)/0,4 кВ, существуют и подстанции более высокого класса напряжений. При проектировании сетей 110, 220, 500 кВ могут возникнуть те же проблемы выбора оптимального места расположения подстанций. Таким образом, имеется необходимость разработки универсального метода определения мест расположения подстанций.

Трансформаторы, классы подстанций и сети

Развитие электроэнергетических систем привело к следующим уровням напряжений сетей электроснабжения в настоящее время: 0,4(0,6) кВ, 10(6) и 20 кВ, 110(35) и 220 кВ, 500(330) кВ [3]. Первый класс напряжений 0,4(0,6) кВ используется непосредственно в установках преобразования электрической энергии в другой вид энергии. Второй класс напряжений используется в распределительных сетях электроснабжения. Стоит отметить и то, что в ряде случаев этот уровень напряжения используется и для питания установок, преобразующих электрическую энергию в другие виды энергии. Третий уровень напряжений используется для транспортировки электрической энергии внутри электроэнергетических систем. Четвертый уровень напряжений необходим для линий межсистемных связей. Представленное деление уровней напряжений не имеет четких границ, но отражает сложившуюся ситуацию на данный момент времени.

Переход с одного уровня напряжения на другой реализуют подстанции, основным элементом которых являются трансформаторы. Очевидно то, что самыми распространенными подстанциями являются подстанции 10(6)/0,4 кВ и 110(35)/10(6) кВ. В настоящее время в некоторых случаях уже вводятся в эксплуатацию подстанции 20/0,4 кВ. Это подстанции недалекого будущего.

Эффективные мощности эксплуатируемых подстанций 10(6)/0,4 кВ находятся в пределах от 25 до 250 кВА. Подстанции 110(35)/10(6) кВ эффективны при мощностях от 2,5 до 200 МВА. Мощности подстанций других уровней напряжения проектируются индивидуально.

Поэтому основной проблемой при проектировании электрических сетей в настоящее время является проблема выбора мест расположения подстанций 10(6)/0,4 кВ и подстанций 110(35)/10(6) кВ.

Основы метода распределенных удельных мощностей

Из разработанных ранее методов определения оптимального расположения подстанций известен метод «центра масс» [4]. В его основу положено представление нагрузок в форме равновысоких цилиндров, площадь оснований которых пропорциональна мощности потребителя. Координаты центра основания цилиндра каждого потребителя соответствуют координатам потребителя. Совокупность всех цилиндров, расположенных на плоскости, образует тело, центр массы которой и определяет оптимальное место расположения цеховой подстанции. Если предприятие имеет несколько цехов, то оптимальное место расположения главной понизительной подстанции более высокого уровня определяется с использованием того же метода, но в качестве «потребителей» используются параметры цеховых подстанций. Речь идет о координатах и мощностях этих подстанций.

В теории проектирования для определения оптимальных мест расположения подстанций известен метод потенциальных поверхностей [4]. Суть метода заключается в том, что каждой точке расположения потребителя на плоскости присваивается электрический потенциал, величина которого пропорциональна мощности потребителя. Результирующее электрическое поле, образованное полями «зарядов» потребителей, представляет собой сложную поверхность. Линии равных «потенциалов» поверхности позволяют выбрать область места расположения подстанции. Описанные методы имеют ряд недостатков, которые не позволяют их использовать в качестве универсальных методов.

Авторами разработан новый метод, позволяющий определить оптимальное место расположения подстанций [5]. Основой метода является представление нагрузки в форме поверхности, описываемой следующей формулой:

$$f(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{\frac{(x-a)^2 + (y-b)^2}{2\sigma^2}},$$

где σ – радиус рассеяния значений функции; *a* и *b* – координаты центра функции на плоскости *xy*.

Объем тела, ограниченного поверхностью f(x, y) и плоскостью x, y, равен единице.

Умножив базовую функцию на мощность потребителя *P*, находящегося в точке с координатами *x*, *y*, получаем поверхность, описываемую уравнением

$$f(x,y) = P \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-a)^2 + (y-b)^2}{2\sigma^2}}.$$

Объем фигуры, ограниченной поверхностью и плоскостью *x*, *y*, равен мощности потребителя.



Рис. 1. Поверхность одного потребителя на площади 60×60 м при $\sigma = 10$ и P = 1000 Вт

На рис. 1 представлена поверхность одного потребителя на площади 60×60 м при $\sigma = 10$ и P = 1000 Вт. Значение функции в каждой точке с координатами *x*, *y* является удельной

мощностью P_{ud} , т.е. мощностью на единицу площади. По этой причине данный метод получил название метода распределенных удельных мощностей.

В основе метода лежит анализ поверхности, описываемой уравнением

$$P_{ud}(x,y) = \sum_{i=1}^{n} P_i \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-a_i)^2 + (y-b_i)^2}{2\sigma^2}},$$

где n – номер потребителя; P_{ud} – удельная мощность в точке поверхности с координатами x, y; P_i – активная мощность *i*-го потребителя; a_i, b_i – координаты расположения *i*-го потребителя.

Анализ результирующей поверхности позволяет определить оптимальное место расположения подстанций системы электроснабжения.

Описанный метод был опробован авторами для оптимизации сети электроснабжения цеха [5]. Однако использование данного метода при проектировании системы электроснабжения населенных пунктов имеет свои особенности.

Определение оптимального места расположения подстанций 10(6)/0,4 кВ

Особенность систем электроснабжения населенных пунктов сельскохозяйственных районов заключается в том, что объекты электроснабжения достаточно разнородны и удалены друг от друга на значительные расстояния. Наряду с частными домами, потребление электроэнергии которых небольшое, в таких населенных пунктах в ряде случаев имеются объекты со значительным потреблением электрической энергии. Это, как правило, предприятия по переработке продукции сельскохозяйственного производства.

На структуру электроснабжения сельскохозяйственных районов повлиял и исторический фактор. На первоначальном этапе развития электроснабжения населенных пунктов потребителями являлись частные домовладения, электроэнергия в которых использовалась практически только для освещения домов и улиц. В настоящее время мощность потребителей возросла в несколько десятков раз. Со временем это привело к реконструкции систем электроснабжения. Развитие сельскохозяйственного производства привело к необходимости строительства предприятий частных предпринимателей, электрическая мощность оборудования которых иногда превосходит мощность подстанций населенных пунктов в несколько раз. В ряде случаев подобные предприятия имеют собственные электрогенерирующие установки. Все это приводит к реконструкции и модернизации районных систем электроснабжения. Первым этапом использования метода при проектировании новых систем электроснабжения или проверки существующих на «оптимальность» является необходимость привязки потребителей к местности. Для этого выбирается географическая нулевая точка отсчета. Направление оси х желательно указать с запада на восток, а ось у – с юга на север. Размер площади рекомендуется выбрать минимальным с расчетом на размещение всех потребителей. При современных технологиях привязать объекты к местности в декартовой системе координат довольно просто.

В качестве примера рассмотрим оптимизацию системы электроснабжения условного населенного пункта Уварово, имеющего 73 домовладения, потребляющего в часы максимальной нагрузки от 1 до 8 кВт. Максимальная суммарная мощность потребителей 462 кВт. Кроме этого, на окраине населенного пункта расположено предприятие, состоящее из трех цехов с суммарной потребляемой мощностью 1400 кВт. Электроснабжение предприятия осуществляется от индивидуальной подстанции.

Проанализируем систему электроснабжения указанного населенного пункта. Для анализа системы была составлена программа для построения поверхности удельной мощности населенного пункта Уварово без учета потребителей предприятия.

На рис. 2 представлен график распределения удельных мощностей при малом радиусе рассеивания, равном 10 м. По осям *x* и *y* имеются деления в десятках метров. Поселок расположен на площади 1500×1400 м. На рис. 2 просматривается расположение отдельных потребителей – домовладений.



Рис. 2. График распределения удельных мощностей при малом радиусе рассеивания

Координаты оптимального места расположения подстанции электроснабжения поселка Уварово определяются следующим образом.

Задается радиус рассеяния удельных мощностей потребителей, равный 400 м. В результате получаем поверхность (рис. 3) распределения удельных мощностей, имеющую вершину с координатами x = 530 и y = 620 м. Эти координаты и являются координатами оптимального места расположения подстанции населенного пункта по критерию минимальных потерь на передачу электрической энергии.



Рис. 3. Поверхность распределения удельных мощностей с вершиной (x = 530 м, y = 620 м)

В пределах населенного пункта имеется предприятие с тремя потребителями электрической энергии с общей мощностью 1400 кВт.

График распределения удельных мощностей этих потребителей по той же поверхности при малом радиусе рассеивания изображен на рис. 4. По этому графику можно определить места расположения цехов предприятия. Рекомендуемое место расположения подстанции предприятия определяется путем построения поверхности удельной мощности при увеличенном радиусе рассеивания. На рис. 5 изображена поверхность удельной мощности при радиусе рассеивания в 100 м с учетом взаимного расположения цехов предприятия. Координаты вершины поверхности соответствуют координатам рекомендуемого места расположения подстанции предприятия. Для наглядности все графики построены в одинаковой системе координат. Рекомендуемое место расположения подстанции предприятия имеет координаты x = 1200 и y = 600 м.



Рис. 4. График распределения удельных мощностей предприятия с тремя потребителями



Рис. 5. Поверхность удельной мощности при радиусе рассеивания в 100 м

Расположение двух подстанций в пределах одного населенного пункта не предполагает прокладку двух линий электропередачи напряжением 10 кВ от районной подстанции 110(35)/10 кВ. Линия должна быть одной, но она должна обеспечить передачу энергии суммарной мощностью двух подстанций 1862 кВт.

Если в пределах населенного пункта располагается предприятие с небольшой мощностью потребления, то рекомендуется проектировать одну подстанцию 10(6)/0,4 кВ, оптимальное место расположения которой вычисляется обычным способом.

Определение оптимального места расположения подстанций 110(35)/10 кВ сельскохозяйственных районов

В настоящее время расположение подстанций 110(35)/10 кВ привязывают к местам расположения административных центров или крупных населенных пунктов. С социальной точки зрения и чаще всего с технической стороны этот подход к решению вопроса может быть оправданным. Именно в районных центрах обычно расположены потребители электроэнергии большой мощности. Однако всегда ли этот выбор является оптимальным? Где лучше всего расположить районную подстанцию? В любом случае для анализа системы электроснабжения места расположения потребителей или подстанций 10(6)/0,4 кВ необходимо привязать к местности способом, описанным ранее.

Координаты рекомендуемого места расположения районной подстанции 110(35)/10(6) кВ можно найти двумя способами. В первом случае необходимо использовать мощности и координаты подстанций 10(6)/0,4 кВ. Эти параметры необходимо ввести в программу построения поверхности удельных мощностей. Изменяя радиус рассеяния от минимального значения, необходимо получить явно выраженную вершину. Координаты этой вершины являются координатами рекомендуемого места расположения подстанции. Этот подход к выбору места не обладает достаточной точностью, так как на этапе выбора мест расположения подстанций 10(6)/0,4 кВ могут быть допущены ошибки. Однако в пользу этого подхода к решению проблемы является сокращение времени вычислений в несколько десятков и сотен раз. С другой стороны, реальные места расположения подстанций 10(6)/0,4 кВ не соответствуют местам, координаты которых получены расчетным путем, так как расположение подстанций зависит от расположения других объектов.

Второй способ основан на использовании первичной информации о местах расположения и мощностей всех потребителей района. Использование этого способа позволяет одновременно уточнить рекомендуемые места расположения подстанций 10(6)/0,4 кВ и вычислить координаты рекомендуемого места расположения районной подстанции. Подробную информацию обо всех потребителях района необходимо ввести в программу, в основу которой положена приведенная ранее формула вычисления удельной распределенной мощности. При определенном радиусе рассеивания получим поверхность, подобную поверхности, изображенной на рис. 6. В качестве примера рассматривается район, в состав которого входят четыре населенных пункта под условными названиями Уварово, Сады, Петровка и Обрыв. Количество населенных пунктов района сокращено до четырех с целью упрощения анализа. Площадь района составляет 10×10 км. По осям *x*, *y* на рисунке нанесены деления в сотнях метров. На рисунке изображена поверхность удельной мощности, соответствующая радиусу рассеивания $\sigma = 300$ м. Координаты вершин «холмов» соответствуют оптимальным местам расположения подстанций 10(6)/0,4 кВ района. Получение оптимальных мест расположения одновременно нескольких подстанций является особенностью метода. Последнее утверждение указывает на то, что в случае отсутствия необходимости индивидуального анализа системы электроснабжения отдельных населенных пунктов места расположения всех подстанций можно вычислить путем анализа системы электроснабжения всего района. Индивидуальный анализ электроснабжения поселка Уварово приведен выше.



Рис. 6. Полученная поверхность



Рис. 7. Поверхность удельной мощности всего района, соответствующая радиусу рассеивания $\sigma = 3000$ м

На рис. 7 представлена поверхность удельной мощности всего района, соответствующая радиусу рассеивания $\sigma = 3000$ м. Явно выраженная вершина имеет координаты x = 5100 м и y = 4000 м. Эти координаты являются координатами оптимального места расположения районной подстанции.

Заключение

Предложенный метод определения мест расположения подстанций, как показано выше, достаточно универсален. Он может использоваться при проектировании систем электроснабжения или для определения оптимальности существующих систем перед их реконструкцией.

Эффективность метода при проектировании систем электроснабжения предприятий показана в опубликованных материалах.

Библиографический список

- 1. *Каменева, В. В.* Область рассеяния центра электрических нагрузок / В. В. Каменева. Москва : МЭИ, 1971.
- Каменева, В. В. К вопросу определения местоположения главных понизительных или распределительных подстанций промышленных предприятий / В. В. Каменева, Э. А. Киреева // Электричество. – 1972. – № 3. – 83–84 с.
- 3. *Идельчик, В. И.* Электрические системы и сети / В. И. Идельчик. Москва : Энергоатомиздат, 2009. – 592 с.
- Федоров, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Федоров, В. В. Каменева. – Москва : Энергоатомиздат, 1984 – 466 с.
- Горячев, В. Я. Математические методы определения центра распределенных по поверхности нагрузок / В. Я. Горячев, С. А. Михайлов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4. – 276 с.

References

- 1. Kameneva V. V. *Oblast' rasseyaniya tsentra elektricheskikh nagruzok* [The scattering region of the center of electrical loads]. Moscow: MEI, 1971. [In Russian]
- Kameneva V. V., Kireeva E. A. *Elektrichestvo* [Electricity]. 1972, no. 3, pp. 83–84. [In Russian]
- Idel'chik V. I. *Elektricheskie sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Moscow: Energoatomizdat, 2009, 592 p. [In Russian]

20

Measuring. Monitoring. Management. Control

- 4. Fedorov A. A., Kameneva V. V. *Osnovy elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy* [Fundamentals of power supply of industrial enterprises]. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 466 p. [In Russian]
- Goryachev V. Ya., Mikhaylov S. A. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental study]. 2013, no. 4, 276 p. [In Russian]

Горячев Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор, кафедра электроэнергетики и электротехники, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: gorvlad1@yandex.ru

Бростилова Татьяна Юрьевна

кандидат технических наук, доцент, кафедра электроэнергетики и электротехники, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: tat-krupkina@yandex.ru

Михайлов Сергей Алексеевич

главный специалист, Московский узел связи энергетики (Россия, г. Москва, ул. Академика Челомея, 5a) E-mail: mihailov989@gmail.com

Тихомирова Анна Алексеевна

старший преподаватель, кафедра электроэнергетики и электротехники, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: an.tihomirova2013@yandex.ru

Бростилов Сергей Александрович

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

Goryachev Vladimir Yakovlevich

doctor of technical sciences, professor, sub-department of power engineering and electrical engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Brostilova Tat'yana Yur'evna

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

Mikhaylov Sergey Alekseevich

main specialist, Moscow communication node energy (5a Akademika Chelomeya street, Moscow, Russia)

Tikhomirova Anna Alekseevna

senior lecturer, sub-department of power engineering and electrical engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Brostilov Sergey Aleksandrovich

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

Образец цитирования:

Проблемы оптимизации систем электроснабжения / В. Я. Горячев, Т. Ю. Бростилова, С. А. Михайлов, А. А. Тихомирова, С. А. Бростилов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 13–21. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-2.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 620.178.5.05

DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-3

А.В.Перов

МОДЕРНИЗАЦИЯ СТЕНДА ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ И УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ ТЕМП-2

A. V. Perov

IMPROVEMENT OF THE TEMP-2 STAND OF ACCELERATIONS AND RATE

Аннотация. Актуальность и цели. Работы по модернизации и совершенствованию экспериментально-испытательной базы предприятия ракетно-космической отрасли направлены на поддержание ее на уровне, обеспечивающем решение задач наземной экспериментальной отработки датчико-преобразующей аппаратуры в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации, а также подтверждение соответствия технических характеристик датчико-преобразующей аппаратуры предъявляемым требованиям. Объектом модернизации является стенд линейных ускорений и угловых скоростей Темп-2, предназначенный для проведения испытаний датчико-преобразующей аппаратуры, передачи размера величины линейного ускорения и угловой скорости низкочастотным линейным акселерометрам, датчикам угловых скоростей, гироскопам. Материалы и методы. В процессе работы по модернизации проведен анализ технического состояния и дефектация стенда, по результатам которых были определены направления совершенствования стенда, обеспечивающие высокую эффективность, производительность и достоверность процессов испытаний и градуировки датчико-преобразующей аппаратуры, основываясь на базовых принципах его работы и функционирования, а также за счет применения более современной и совершенной элементной базы. Изготовлены детали и узлы, а также выполнены их монтаж и сборка до рабочего состояния. Проведены пуско-наладочные работы, включающие комплексное опробование, наладку стенда, проведение автономных и типовых испытаний, а также испытаний в целях утверждения типа и подготовку стенда к производственному процессу. Результаты. Полученные в ходе работ результаты могут найти применение при разработке и модернизации метрологического обеспечения датчико-преобразующей аппаратуры, предназначенной для комплектации изделий ракетнокосмической техники. Выводы. Примененные в данной работе методы позволили значительно улучшить метрологические характеристики модернизируемого стенда, а также снизить экономические затраты на обслуживание и возможное дальнейшее расширение функциональных возможностей стенда в будущем.

A b s t r a c t. *Background*. Improvement and upgrading of the experimental and test base of the enterprise of the rocket and space industry is aimed at maintaining it at a level that ensures the solution of the tasks of ground-based experimental testing of sensor-transforming equipment in conditions close to actual operating conditions, as well as confirming the conformity of the sensor-transforming technical characteristics equipment requirements. The ob-

Measuring. Monitoring. Management. Control

ject of improvement is the Temp-2 acceleration and rate stand, designed to test sensorconverting equipment, transfer linear acceleration size and angular velocity to low-frequency accelerometers, angular velocity sensors, and gyroscopes. Materials and methods. In the course of the modernization work, an analysis of the technical condition and stand fault detection was carried out, the results of which determined the directions for improving the stand, ensuring high efficiency, productivity and reliability of the testing and calibration processes of sensor-transforming equipment, based on the basic principles of its operation and functioning, as well as through the use of more modern and improved element base. Manufacturing of parts and assemblies, as well as their installation and assembly to working condition. Precommissioning works were carried out, including comprehensive testing, stand setup, autonomous and type testing, as well as tests for type approval and preparation of the stand for the production process. Results. The results of the work can be applied in the development and improvement of the metrological support of sensor-transforming equipment intended for the assembly of rocket and space technology products. Conclusions. The methods used in this work allowed to significantly improve the metrological characteristics of the upgraded stand, as well as to reduce the economic costs of maintenance and possible further expansion of the functional capabilities of the stand in the future.

Каючевые сао в а: ракетно-космическая техника, центрифуга, линейное ускорение, угловая скорость, датчико-преобразующая аппаратура, автоматизированный стенд.

K e y w o r d s: rocket and space technology, centrifuge, linear acceleration, angular velocity, sensor-converting equipment, automated stand.

Ракетно-космическая техника (РКТ) является одним из самых высокотехнологичных образцов научно-производственной деятельности. Измерительные задачи, решаемые в процессе наземной отработки и эксплуатации изделий РКТ, охватывают практически все физические параметры (давление, температура, линейные ускорения, вибрация, линейные и угловые перемещения, напряжение электрического тока, плотность и температура, характеристики магнитного и гравитационного полей и т.п.). Предъявляемые жесткие требования к качеству и надежности датчико-преобразующей аппаратуры (ДПА), применяемой для решения измерительных задач в РКТ, приводят к необходимости всестороннего полноценного подтверждения ее характеристик в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Проведение испытаний с целью подтверждения характеристик ДПА является одной из наиболее важных стадий ее производства. При этом следует отметить, что без опережающего развития экспериментально-испытательной базы невозможно выполнять требования по качеству и безопасности [1] в запланированные сроки.

Проблемы переоснащения экспериментально-испытательной базы предприятий ракетно-космической промышленности обусловлены морально устаревшим и физически изношенным оборудованием, недостаточным уровнем и объемом работ по созданию задела в части разработки перспективного испытательного и метрологического оборудования. Состояние стендовой базы предприятий ракетно-космической промышленности требует проведения реконструкции, разработки и приобретения современного высокопроизводительного испытательного оборудования. В условиях значительных финансовых затрат, необходимых для переоснащения экспериментально-испытательной базы предприятий ракетно-космической отрасли, актуальной задачей является модернизация испытательных стендов в части улучшения технических характеристик, повышения точности и достоверности воспроизведения и измерения условий испытаний, в то время как значительная часть оборудования, обеспечивающего наземную отработку PKT, находится за пределом нормативного срока эксплуатации.

Своевременная модернизация и совершенствование оборудования на предприятии является основой для повышения производительности труда, улучшения экономических показателей, а также расширения технических возможностей и выполнения требований техники безопасности. Именно поэтому актуальной задачей для АО «НИИФИ» явилась модернизация стенда линейных ускорений и угловых скоростей Темп-2 в рамках опытно-конструкторской работы. Стенд Темп-2 применяется для выполнения операций настройки, оценки действи-

тельных значений технических характеристик ДПА, технического освидетельствования средств измерений линейного ускорения, испытаний ДПА при воздействии на них постоянного центробежного ускорения.

Темп-2 был разработан Ленинградским политехническим институтом в 1989 г. и представлял из себя высокоточную прецизионную центрифугу, закрепленную на бетонном фундаменте, с подключенными к ней пультом управления скоростью вращения ротора, блока подготовки воздуха, а также комплекта аппаратуры, предназначенной для измерения сигналов и питания испытуемых приборов. Принимая во внимание тот факт, что Темп-2 проектировался со значительным запасом механической прочности, степень изношенности многих его кинематических узлов, как правило, незначительна. В связи с этим модернизация Темп-2 включает в себя прежде всего полную замену электроники на новые, современные и более надежные устройства с возможностью удаленного программного управления по различным каналам связи; ремонт его кинематической системы; установку новых датчиков и блоков измерения, управления и регистрации; дооснащение специальными приспособлениями и измерительными приборами для проведения необходимых испытаний, а также персональным компьютером (ПК) со специальным программным обеспечением (ПО), позволяющим автоматизировать, упростить и ускорить процесс проведения испытаний.

Структурно стенд линейных ускорений и угловых скоростей Темп-2 разделен на три основные части (рис. 1):

 центрифугу, закрепленную на бетонном фундаменте, с механизмом вращения поворотного стола, приводимого в действие с помощью серводвигателя;

стойку управления, содержащую средства управления и встроенные средства измерений;



– рабочее место оператора, содержащее ПК и внешние средства измерений.

Рис. 1. Структурная схема стенда линейных ускорений и угловых скоростей Темп-2

Центрифуга стенда является высокоточным прецизионным оборудованием, поэтому сохранение и возможное улучшение точностных характеристик стенда после замены значительной части ключевых узлов в ходе модернизации являлись также одной из приоритетных задач.

Одним из главных принципов, применяемых при модернизации стенда, стало использование унифицированной элементной базы в блочном исполнении всех основных узлов стенда. Применение этого принципа позволило значительно повысить ремонтопригодность стенда, а также увеличило возможность дальнейшего наращивания его функционала без полной замены уже имеющегося оборудования.

Прежде всего в ходе модернизации стенда была произведена замена штатного двигателя постоянного тока на асинхронный серводвигатель переменного тока. Основным недостатком

штатного двигателя являлся частый износ контактных дорожек на роторе, что вызывало сначала ухудшение стабильности работы, а затем и полный его отказ. Замена на другой двигатель постоянного тока могла помимо вышеуказанного недостатка повлечь и другие, такие как низкая помехоустойчивость, сложность в настройке и нестабильность параметров. Современные серводвигатели, управляемые контроллерами с частотными преобразователями, этими недостатками не обладают и являются более предпочтительными благодаря наличию современных шин и удобных протоколов обмена. Кроме того, микроконтроллеры, управляющие частотным преобразователем серводвигателя, позволяют обрабатывать данные за период в несколько десятков микросекунд (еще десять лет назад это время составляло 200 мс), что позволило расширить диапазон регулирования с обратной связью с высокой точностью поддержания скорости во всем диапазоне [2]. Встроенный высокоскоростной коммуникационный интерфейс СА Nopen позволяет приводу интегрироваться с другими средствами автоматизации наиболее эффективно и рационально. Управление в замкнутом контуре, фильтр подавления резонанса и вибрации, а также функция портальной синхронизации помогают управлять сложным движением, требующим высокой точности и гладкости хода. Контроллер серводвигателя имеет возможность не только быстрого разгона поворотного стола, но и быстрого торможения, что позволяет полностью исключить устаревшую систему тормозных блоков с пневмоприводом. При динамическом торможении кинетическая энергия ротора генератора преобразуется в электрическую, а затем подается на тормозной резистор, где рассеивается в виде тепла.

В качестве датчика обратной связи был применен инкрементальный энкодер, который обладает существенными точностными преимуществами по сравнению с ранее установленным импульсным датчиком скорости за счет значительного увеличения разрешающей способности (на несколько порядков), которое достигнуто благодаря увеличению количества меток, нанесенных на диск энкодера, а также применению методов интерполяции выходного сигнала без потерь в точности.

Возможная проблема наложения высокочастотной помехи, возникающей от воздействия контроллера серводвигателя на измерительные сигналы каналов датчиков обратной связи и испытываемых изделий, была решена применением экранированных кабелей на этих каналах, а также установкой сетевого дросселя и высокочастотного сетевого фильтра на входе частотного преобразователя. В целях повышения эксплуатационных характеристик в системе [3], улучшения электромагнитной совместимости оборудования и уменьшения помех был использован радиочастотный фильтр на три фазы. В качестве дополнительной степени защиты измерительных каналов от помех используется сетевой дроссель, который ограничивает скорость нарастания стартового тока в цепи и взаимное влияние коммутационных преобразователей, запитываемых от одного и того же трансформатора. Процесс коммутации в цепях с сетевыми дросселями протекает плавно, коммутационные перенапряжения подавляются. Кроме того, сетевые дроссели предохраняют электрическую цепь от нежелательного влияния преобразователей, ограничивая воздействие всех гармоник сети [4].

Электрическая связь измерительных приборов и источников питания с приборами, установленными на подвижной платформе центрифуги, осуществляется через многоканальное токосъемное устройство. В ходе модернизации стенда штатный ртутный двадцатидвухканальный токосъем был заменен на два высокоскоростных щеточных двенадцатиканальных токосъемных устройства. Ртутный токосъем очень требователен в эксплуатации: требует периодическую замену проводящего вещества (ртути), а также должен эксплуатироваться в хорошо вентилируемых помещениях из-за риска накопления паров ртути, которые могут нанести серьезный вред здоровью персонала. Выбор щеточных токосъемных устройств является наиболее предпочтительным, так как современные модели обладают низким сопротивлением контактов (менее 20 мОм) при низкой динамической нестабильности сопротивления (около 10 мОм) [5].

Согласованность работы всех внутренних систем, обработка массивов данных, а также автоматизация всевозможных процессов и операций, выполняемых при проведении испытаний, обеспечивается специализированным ПО [6]. При выборе среды программирования для подобных задач следует руководствоваться такими критериями оценки продукта, как:

 особенности архитектуры и функциональные возможности (мобильность, масштабируемость, распределенность, сетевые возможности);

– моделирование данных (используемая модель данных, триггеры и хранимые процедуры, средства поиска, предусмотренные типы данных, реализация языка запросов);

Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

– контроль работы системы (контроль использования памяти компьютера, автонастройка, режимы отладки);

 производительность (рейтинг TPC, возможности параллельной архитектуры, возможности оптимизирования запросов);

– надежность (восстановление после сбоев, резервное копирование, откат изменений, многоуровневая система защиты);

- стоимость.

Преимуществом по большинству приведенных критериев обладает графическая среда объектно-ориентированного программирования LabVIEW, поэтому в качестве среды разработки был выбран именно этот прикладной программный пакет. LabVIEW поддерживает огромный спектр оборудования различных производителей и имеет в своем составе (либо позволяет добавлять к базовому пакету) многочисленные библиотеки компонентов для:

– подключения внешнего оборудования по наиболее распространенным интерфейсам и протоколам (USB, RS-232, GPIB 488, TCP/IP и пр.);

- удаленного управления процессом испытания;
- генерации и цифровой обработки сигналов;
- применения разнообразных математических методов обработки данных;
- визуализации данных и результатов их обработки (включая трехмерные модели);
- моделирования сложных систем;
- хранения информации в базах данных и генерации отчетов;
- взаимодействия с другими приложениями в рамках COM, DCOM, OLE и пр. [7].

Для стенда были разработаны две единицы программного обеспечения: для встроенного компактного безвентиляторного компьютера, расположенного в стойке управления стендом, и для персонального компьютера, располагающуюся непосредственно на рабочем месте оператора (рис. 2). ПО, установленное на встроенный безвентиляторный компьютер, обеспечивает согласованную работу внутренних систем и приборов стенда, а также осуществляет передачу данных между ними. Взаимодействие ПО с мультиметром и системой сбора данных осуществляется по интерфейсу USB с применением стандартных для приборов такого типа SCPI-команд-запросов; взаимодействие с контроллером серводвигателя осуществляется через USB-COM конвертер с использованием протокола MODBUS ASCII, который позволет осуществлять его параметризацию с высокой скоростью и надежностью. Данное ПО не имеет графического пользовательского интерфейса для взаимодействия с оператором, а коммуникация с ним производится только по широко применяемой технологии проводных локальных сетей Ethernet с использованием стенемой технологии проводных локальных сетей Ethernet с использованием сетевого протокола TCP/IP, для чего была разработана собственная система команд-запросов.



Рис. 2. Взаимодействие компонентов программного обеспечения

Measuring. Monitoring. Management. Control

При работе со стендом оператор взаимодействует с ПО, установленным на ПК, располагающемся на рабочем месте оператора (рис. 3). Данная программа осуществляет наглядное представление текущей информации о состоянии стенда и испытываемого изделия, позволяет собрать, обобщить и отправить на печать полученную измерительную информацию, а также автоматизировать процессы проведения испытаний по заранее записанным сценариям работы.



Рис. 3. Графический пользовательский интерфейс некоторых окон программного обеспечения дистанционного управления стенда Темп-2

Технические характеристики стенда до и после модернизации представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики стенда Темп-2

	Значение характеристики		
Наименование технической характеристики	Наименование технической характеристики до модернизации	после	
		модернизации	
Диапазон воспроизведения линейных ускорений, м/с ²	5-1500	5-1800*	
Диапазон воспроизведения угловых скоростей, рад/с	3-70	3–70	
Дискретизация задания и воспроизведения ускорения, м/с ²	не более 0,05	0,03	
Относительная среднеквадратическая погрешность			
воспроизведения линейных ускорений, %, не более:			
– в диапазоне от 5 до 10 м/с ²	не более 1	не более 1	
– в диапазоне от 10 до 100 м/c ²	не более 0,3	не более 0,2	
– в диапазоне от 100 до 1500 м/с ²	не более 0,05	не более 0,03	
Масса контейнера с испытываемыми изделиями, кг	не более 2	не более 2	
Время выхода центрифуги на режим максимального	иа балаа 70 иа балаа 20		
ускорения, с	He oollee /0	He bonee 50	
Время до полной остановки с режима максимального	не более 60	не более 30	
ускорения, с	не облее об	не облее зо	
Вывод центрифуги на заданный оператором режим	PRVIIIIVIO	ABTOMATHIRCKI	
ускорения	вручную	автоматически	
Число каналов токосъема	22	24	
Нестабильность сопротивления канала токосъема, Ом	не более 0,05	не более 0,05	

П р и м е ч а н и е. *До 1800 м/с² в режиме воспроизведения угловой скорости и до 1500 м/с² в режиме воспроизведения линейных ускорений.

Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

Согласно приведенным в табл. 1 данным, относительная погрешность почти на всем рабочем диапазоне стенда и временные параметры выхода на режим максимального ускорения после модернизации значительно улучшились за счет применения более совершенной элементной базы. Использование ПО на базе графической среды объектно-ориентированного программирования LabVIEW в процессе испытаний позволило снизить вероятность субъективной погрешности, вносимой оператором, повысить производительность испытаний датчиков в несколько раз, значительно сократить время проведения испытаний. Кроме того, применение унифицированного и блочного принципов построения элементной базы при модернизации позволит в перспективе существенно снизить экономические и трудовые затраты при ремонте и обслуживании стенда.

Библиографический список

- 1. *Ярославцева, Д. А.* Пример внедрения интеллектуальных информационноизмерительных систем на объектах стартовых комплексов космодрома / Д. А. Ярославцева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 1 (23). – С. 24–31.
- Каталог продукции ООО «ИНТЕХНИКС». URL: http://www.intechnics.ru/article14.htm (дата обращения: 24.06.2018).
- Каталог продукции AO «Системы реального времени». URL: http://www.rts.ua/ catalog/delta/pdf3/radiochastotnye-filtry-ems_388.pdf (дата обращения: 19.10.2018).
- Каталог продукции CAA. URL: https://www.saa.su/Manual/DELTACeтевые %20дроссели %20Delta/TexTexничес %20данные %20Трехфазные.pdf (дата обращения: 19.10.2018).
- Каталог продукции Senring Electronics Co. Limited. URL: http://senring.ru/product/ sng038-12 (дата обращения: 24.06.2018).
- 6. Бастрыгин, К. И. Система измерения, мониторинга, контроля и диагностики параметров ракетного двигателя / К. И. Бастрыгин, А. А. Трофимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 3 (21). С. 18–25.
- Виноградова, Н. А. Разработка прикладного программного обеспечения в среде Lab-VIEW : учеб. пособие / Н. А. Виноградова, Я. И. Листратов, Е. В. Свиридов. – Москва : Изд-во МЭИ, 2015. – С. 240.

References

- 1. Yaroslavtseva D. A. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 1 (23), pp. 24–31. [In Russian]
- 2. *Katalog produktsii OOO «INTEKhNIKS»* [Catalogue of products of LLC "INTEKHNIKS»]. Available at: http://www.intechnics.ru/article14.htm (accessed Jun. 24, 2018). [In Russian]
- Katalog produktsii AO «Sistemy real'nogo vremeni» [Catalogue of products of JSC "Real time systems»]. Available at: http://www.rts.ua/catalog/delta/pdf3/radiochastotnye-filtryems_388.pdf (accessed Oct. 19, 2018). [In Russian]
- 4. *Katalog produktsii SAA* [Catalogue of products of CAA]. Available at: https://www.saa.su/Manual/DELTASetevye %20drosseli %20Delta/TekhTekhniches %20dannye %20Trekhfaznye.pdf (accessed Oct. 19, 2018). [In Russian]
- Katalog produktsii Senring Electronics Co. Limited [Catalogue of products of Senring Electronics Co. Limited]. Available at: http://senring.ru/product/sng038-12 (accessed Jun. 24, 2018). [In Russian]
- Bastrygin K. I., Trofimov A. A. Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 3 (21), pp. 18–25. [In Russian]
- Vinogradova N. A., Listratov Ya. I., Sviridov E. V. Razrabotka prikladnogo programmnogo obespecheniya v srede LabVIEW: ucheb. posobie [Development of application software in LabVIEW environment : tutorial]. Moscow: Izd-vo MEI, 2015, p. 240. [In Russian]

Перов Александр Владимирович

инженер-конструктор, Научно-исследовательский институт физических измерений (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10) E-mail: perov.alex.v@gmail.com **Perov Alexander Vladimirovich** design engineer, Scientific-research Institute of physical measurements (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Перов, А. В. Модернизация стенда линейных ускорений и угловых скоростей Темп-2 / А. В. Перов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 22–29. – DOI 10.21685/ 2307-5538-2019-2-3.

Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

УДК 532.57

DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-4

М. С. Ревунов

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КРОССКОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПУТЕМ ЭКВАЛИЗАЦИИ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ

M. S. Revunov

EQUALIZATION OF THE IMAGE TO IMPROVE CROSS-CORRELATION MEASUREMENT METHOD

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. На современных быстроходных бумагоделательных машинах остро стоит вопрос о необходимости измерения скорости напуска бумажной массы на сеточную часть. Применение контактных методов измерения и измерителей на базе лазеров ограничено рядом объективных причин, связанных с конструктивными особенностями машины. В связи с этим на первый план выходят оптические методы измерения скорости потока жидкости. Целью работы является повышение точности стандартного кросскорреляционного метода измерения скорости путем эквализации расчетной области. Материалы и методы. В работе использованы современные методы цифровой обработки изображений. Результаты. Обоснованы принципы совершенствования стандартного кросскорреляционного метода измерения скорости потока жидкости. Выводы. Исследования подтверждают применимость эквализации расчетных областей для совершенствования стандартного кросскорреляционного метода.

A b s t r a c t. *Background*. It is necessary to measure the speed of the paper pulp on paper machines. Optical measurement methods can be used to measure the paper flow rate. The aim of the work is to improve the accuracy of the cross-correlation method of speed measurement by equalizing the computational domain. *Materials and methods*. The article uses modern methods of digital image processing. *Results*. The principles of improving the standard cross-correlation method for measuring the velocity of fluid flows are substantiated. *Conclusions*. Studies confirm the applicability of these methods to improve the standard cross-correlation method.

К **л** ю ч е в ы е с л о в а: бумагоделательная машина, напорный ящик, кросскорреляционный алгоритм, расчетная область, эквализация.

K e y w o r d s: paper machine, pressure device, cross-correlation algorithm, computational domain, equalization.

Введение

Для изучения потоков жидкости часто применяют методы трассерной визуализации. Суть методов трассерной визуализации заключается в том, что в жидкость добавляют частички-трассеры (или они уже имеются в исследуемом объекте) и наблюдают за их перемещением в потоках [1–3]. Движение частиц фиксируется с помощью современных фото- или видеокамер, а базовым алгоритмом обработки таких изображений принято считать кросскорреляционный алгоритм (ККА).

Стандартный ККА (рис. 1) состоит из следующих основных операций:

- кадрирование видео и формирование набора изображений потока жидкости;
- разбиение пары изображений на элементарные расчетные области равного размера;

© Ревунов М. С., 2019

 – расчет кросскорреляционной функции и нахождение координат ее максимума с подпиксельной точностью;

– расчет скорости потока жидкости по данным перемещения максимума кросскорреляционной функции от кадра к кадру [4–6].



Рис. 1. Стандартный кросскорреляционный алгоритм

Постановка задачи

Актуальной проблемой для российских бумажных фабрик, не позволяющей отечественной продукции полноценно конкурировать с импортными товарами, является существенная дисперсия веса бумажного полотна. Стоит отметить, что на современных отечественных быстроходных бумагоделательных машинах (БДМ) отсутствуют какие-либо средства контроля и измерения скорости напуска бумажной массы из напорного устройства на сеточную часть машины. В то же время в работах [7–9] подтверждена экстремальная зависимость между скоростью сеточного стола v_c , скоростью напуска бумажной массы $v_{\rm H}$ и дисперсией веса бумаги. Однако изменение скорости постоянной части БДМ ведет к изменению технологических режимов и влияет на все элементы и подсистемы машины. Поэтому для минимизации неравномерности просвета необходимо постоянно измерять скорость напуска бумажной массы с помощью оптико-электронных приборов и изменять ее, регулируя напор в напускном устройстве [10, 11].

На рис. 2 и 3 приведены фотографии процесса напуска бумажной массы на сетку БДМ, а на рис. 4 – тренды скорости напуска бумажной массы на сетку, измеренной с помощью различных методов.



Рис. 2. Процесс напуска бумажной массы (вид сбоку)

Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль



Рис. 3. Процесс напуска бумажной массы (вид сверху)



Рис. 4. Тренды скорости потока бумажной массы: *a* – рассчитанной с помощью стандартного ККА; *б* – измеренной с помощью лазерного датчика

Стандартный кросскорреляционный алгоритм имеет ряд ограничений и не всегда применим для необработанных изображений. В связи с этим на первый план выходит задача повышения точности ККА измерения путем цифровой обработки исходных изображений, используемых для расчета скорости напуска бумажной массы на сеточный стол БДМ, поиска оптимального размера расчетной области и интервала корреляции, а также эквализации расчетной области.

Поиск «оптимального окна» и интервала корреляции

Быстродействие и точность алгоритма бесконтактного измерения скорости на базе кросскорреляционного метода достаточно сильно зависит от размера расчетной области. В теории [5, 6] размер расчетной области должен быть настолько большим, насколько это возможно технически. Однако на практике обработка слишком больших расчетных областей приводит к снижению быстродействия до недопустимых показателей. Выходом из сложившейся ситуации является минимизация размера расчетной области путем поэтапного равномерного усечения кадра со всех сторон до размеров, при которых достигается требуемая точность измерения (рис. 5).

Measuring. Monitoring. Management. Control



Рис. 5. Исходный и усеченные кадры на *i*-м шаге

Для поиска «оптимального окна» необходимо проанализировать форму кросскорреляционной функции (идеальный случай – четко выраженный одиночный пик), полученную при сравнении исходного и усеченного *i*-го кадра (рис. 6).



Рис. 6. Примеры кросскорреляционных функций для кадров с разной степенью усечения

Данные об оптимальном размере расчетной области кадра дают нам возможность полноценно определить интервал корреляции. Интервал корреляции также будет оцениваться по форме кросскорреляционной функции (ККФ), полученной, однако, при сравнении первого кадра (или его области, если для получения «оптимального окна» необходимо усечение исходного кадра) с последующими (рис. 7). Интервал корреляции является очень важным параметром, так как позволяет сформулировать минимальные требования к видеоаппаратуре (например, разрешение и частота кадров в секунду) для съемки потока бумажной массы.



Рис. 7. Примеры ККФ для оценки интервала корреляции

Эквализация расчетной области кадра

Довольно часто необработанным изображениям свойственны яркостные искажения. Причины могут быть самые разные, но в большинстве случаев это объясняется несовершенством видеоаппаратуры. В результате на таких изображениях детали различаются плохо или вообще не различаются (рис. 8). Таким образом, для корректной работы алгоритма бесконтактного измерения скорости напуска бумажной массы на сетку БДМ на основе методов кросскорреляции необходима дополнительная цифровая обработка изображений – эквализация [12].



Рис. 8. Примеры фотографий (видеокадров) сеточного стола, сделанных при одинаковых условиях на разную видеоаппаратуру: a – Nikon Coolpix P500; δ – Nikon D3100

Для повышения контрастности изображений (рис. 9) были использованы методы выравнивания гистограмм значений яркостей элементов [13, 14]. Результирующие графики перемещения кросскорреляционного максимума представлены на рис. 10. Стоит отметить, что, если пренебречь обработкой изображения, - это будет приводить к вырожденным всплескам расчетной скорости, что (в нашем случае) не соответствует действительности.



Рис. 9. Примеры: а – изображений; б – гистограмм значений яркостей; в - кросскорреляционных максимумов до и после эквализации

Measuring. Monitoring. Management. Control





Таким образом, в результате эквализации гистограммы исходных кадров существенно расширяется динамический диапазон изображения, что позволяет отобразить ранее не замеченные детали. Это является критически важным фактором для ККА. Особенно сильно этот эффект проявляется на темных изображениях (рис. 9,*a*) или изображениях с недостаточной освещенностью (рис. 8,*a*). Кроме того, в отличие от большинства фильтров и градационных преобразований, требующих настройки параметров (апертуры и констант градационных преобразований), эквализация гистограммы может выполняться в полностью автоматическом режиме [13].

Заключение

Измерительное устройство на базе кросскорреляционного алгоритма в совокупности с качественной современной видеоаппаратурой является универсальным способом бесконтактного измерения скорости потока жидкости. В отличие от лазерных доплеровских устройств измеритель на базе кросскорреляционного алгоритма не зависит от номинальных расстояний от оптики датчика до поверхности объекта наблюдения, что существенно облегчает его интеграцию в действующие АСУТП (например, позволяет вынести устройство измерения из агрессивной среды, в которой может находиться объект исследования).

Безусловно, по сравнению с лазерными датчиками скорости измерители на базе стандартного кросскорреляционного алгоритма обладают более низкой точностью и более скромИзмерение. Мониторинг. Управление. Контроль

ным диапазоном измеряемых скоростей. Однако грамотное применение методов цифровой обработки исходных изображений, способов поиска оптимального размера расчетной области и ее эквализация позволяют приблизиться кросскорреляционным измерителям скорости к лазерным по следующим основным показателям:

- погрешность измерения 0,05 %;
- диапазон измерений 0,02 30 м/с;
- расстояние до объекта 0,1 10 м.

Таким образом, исследования подтверждают применимость методов эквализации расчетных областей для совершенствования стандартного кросскорреляционного алгоритма.

Библиографический список

- Алексеенко, С. В. Применение метода цифровой трассерной визуализации для анализа турбулентных потоков с периодической составляющей / С. В. Алексеенко, А. В. Бильский, Д. М. Маркович. – Москва : Приборы и техника эксперимента, 2004.
- 2. Франсон, М. А. Оптика спеклов / М. А. Франсон. Москва : Мир, 1990.
- 3. *Ринкевичюс, Б. С.* Лазерная диагностика потоков / Б. С. Ринкевичюс. Москва : Знание, 1996.
- 4. Прэтт, У. Н. Цифровая обработка изображений / У. Н. Прэтт. Москва : Мир, 2000.
- Ахметбеков, Е. К. Корреляционная коррекция в методе слежения за частицами в потоках / Е. К. Ахметбеков, Д. М. Маркович, М. П. Токарев. – Москва : Вычислительные технологии, 2010.
- Ревунов, М. С. Минимизация дисперсии веса бумажного полотна с использованием кросскорреляционного метода / М. С. Ревунов, А. Д. Семенов, С. В. Волков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015.
- 7. Иванов С. Н. Технология бумаги / С. Н. Иванов. Москва : Лесная промышленность, 1985.
- Кугушев, И. Д. Теория процессов отлива и обезвоживания бумажной массы / И. Д. Кугушев. – Москва : Мир, 2007.
- 9. Никулин, С. В. Экстремальное управление инерционным объектом с запаздыванием в условиях сильных помех / О. В. Авдеева, Д. В. Артамонов, С. В. Никулин, А. Д. Семенов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3. – С. 54–64.
- 10. *Фляте, Д. М.* Технология бумаги / Д. М. Фляте. Москва : Лесная промышленность, 1988.
- 11. *Ревунов, М. С.* Совершенствование систем стабилизации параметров потока бумажной массы с использованием кросскорреляционного алгоритма / М. С. Ревунов. Пенза : Изд-во ПГУ, 2018.
- 12. *Хрящев, Д. А.* Повышение качества изображений, полученных в условиях недостаточной освещенности / Д. А. Хрящев. Ростов-на-Дону : Северо-Кавказский научный центр высшей школы ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет», 2013.
- Цифровая обработка изображений в информационных системах / И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых, Г. И. Перетягин, А. А. Спектор. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2000.
- Федотов, А. А. Методы компьютерной обработки биомедицинских изображений в среде MATLAB : учеб. пособие / А. А. Федотов, С. А. Акулов, А. С. Акулова. – Самара : Изд-во СГАУ, 2015.

References

- 1. Alekseenko S. V., Bil'skiy A. V., Markovich D. M. *Primenenie metoda tsifrovoy trassernoy vizualizatsii dlya analiza turbulentnykh potokov s periodicheskoy sostavlyayushchey* [Application of the digital tracer imaging method for the analysis of turbulent flows with periodic component]. Moscow: Pribory i tekhnika eksperimenta, 2004. [In Russian]
- 2. Franson M. A. Optika speklov [Speckle optics]. Moscow: Mir, 1990. [In Russian]
- 3. Rinkevichyus B. S. *Lazernaya diagnostika potokov* [Laser flow diagnostics]. Moscow: Znanie, 1996. [In Russian]
- 4. Prett U. N. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital image processing]. Moscow: Mir, 2000. [In Russian]
- 5. Akhmetbekov E. K., Markovich D. M., Tokarev M. P. *Korrelyatsionnaya korrektsiya v metode slezheniya za chastitsami v potokakh* [Correlation correction in the method of tracking particles in the flow]. Moscow: Vychislitel'nye tekhnologii, 2010. [In Russian]

36
- 6. Revunov M. S., Semenov A. D., Volkov S. V. *Minimizatsiya dispersii vesa bumazhnogo polotna s ispol'zovaniem krosskorrelyatsionnogo metoda* [Minimization of the variance of the weight of the paper using the cross-correlation method]. Penza: Izd-vo PGU, 2015. [In Russian]
- Ivanov S. N. *Tekhnologiya bumagi* [Paper technology]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1985. [In Russian]
- 8. Kugushev I. D. *Teoriya protsessov otliva i obezvozhivaniya bumazhnoy massy* [Process theory of the ebb and dewatering of paper pulp]. Moscow: Mir, 2007. [In Russian]
- 9. Nikulin S. V., Avdeeva O. V., Artamonov D. V., Semenov A. D. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2014, no. 3, pp. 54–64. [In Russian]
- Flyate D. M. *Tekhnologiya bumagi* [Paper technology]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1988. [In Russian]
- 11. Revunov M. S. Sovershenstvovanie sistem stabilizatsii parametrov potoka bumazhnoy massy s ispol'zovaniem krosskorrelyatsionnogo algoritma [Improvement of systems of stabilization of parameters of the flow of paper pulp using a cross-correlation algorithm]. Penza: Izd-vo PGU, 2018. [In Russian]
- 12. Khryashchev D. A. *Povyshenie kachestva izobrazheniy, poluchennykh v usloviyakh nedostatochnoy osveshchennosti* [Improving the quality of images obtained in low-light conditions]. Rostov-on-Don: Severo-Kavkazskiy nauchnyy tsentr vysshey shkoly FGAOU VPO «Yuzhnyy federal'nyy universitet», 2013. [In Russian]
- 13. Gruzman I. S., Kirichuk V. S., Kosykh V. P., Peretyagin G. I., Spektor A. A. *Tsifrovaya* obrabotka izobrazheniy v informatsionnykh sistemakh [Digital image processing in information systems]. Novosibirski: Novosibirskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2000. [In Russian]
- 14. Fedotov A. A., Akulov S. A., Akulova A. S. *Metody komp'yuternoy obrabotki biomeditsinskikh izobrazheniy v srede MATLAB: ucheb. posobie* [Methods of computer processing of biomedical images in MATLAB : tutorial]. Samara: Izd-vo SGAU, 2015. [In Russian]

Ревунов Максим Сергеевич

инженер отдела автоматизированных систем управления технологическими процессами, Маяктрансэнерго (Россия, г. Пенза, ул. Бумажников, 13а); аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: Revunov_rabota@mail.ru

Revunov Maksim Sergeevich

engineer of department of automated systems technological process control, Mayaktransenergo (13A Bumazgnikov street Penza, Russia); postgraduate student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Ревунов, М. С. Повышение точности кросскорреляционного метода измерения скорости путем эквализации расчетной области / М. С. Ревунов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 30–37. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-4.

УДК 621.3.014.14:621.3.088

DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-5

С. В. Абрамов, Н. С. Ульянин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ НЕПОЛНОЙ КОМПЕНСАЦИИ НЕИНФОРМАТИВНОГО ПАРАМЕТРА

S. V. Abramov, N. S. Ul'yanin

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE TEMPERATURE ERROR OF EDDY CURRENT DISPLACEMENT TRANSDUCER TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF INCOMPLETE COMPENSATION OF THE UNINFORMATIVE PARAMETER

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Исследование температурных погрешностей первичных вихретоковых преобразователей (ПВП) является актуальной проблемой при измерении перемещений, особенно для квазидифференциальных схем, в которых помимо оценки температурного влияния на выходной сигнал ПВП необходимо учитывать еще влияние некомпенсации неинформативного параметра. Целью работы является оценка влияния температуры на выходной сигнал ПВП при влиянии неполной компенсации неинформативного параметра. Целью работы является оценка влияния температуры на выходной сигнал ПВП при влиянии неполной компенсации неинформативного параметра. Целью работы является оценка влияния температуры на выходной сигнал ПВП при влиянии неполной компенсации неинформативного параметра. С помощью дая связывающих входное напряжение с выходным током. *Результаты*. С помощью предложенной модели определены значения выходного тока ПВП при воздействии температуры и при условии неполной компенсации неинформативного параметра. Рассчитаны относительные погрешности измерения. *Выводы*. Полученные результаты в статье доказывают необходимость выполнения идентичного изготовления измерительной и компенсационной катушек индуктивности.

A b s t r a c t. *Background*. The study of temperature errors of primary eddy current transducers (PVP) is an urgent problem in the measurement of displacements, especially for quasidifferential schemes, in which in addition to assessing the temperature effect on the output signal of PVP, it is necessary to take into account the influence of the incompensation of the uninformative parameter. The aim of the work is to assess the effect of temperature on the output signal of PVP under the influence of not full compensation of the uninformative parameter of the equivalent circuit. *Materials and methods*. To solve this problem, a model of PVP based on differential equations relating the input voltage to the output current is created. *Results*. With the help of the proposed model, the output current of the measuring circuit is estimated under the influence of temperature and under the condition of incomplete compensation of the uninformative parameter. The relative measurement errors are calculated. *Conclusions*. The results obtained in the article prove the need for identical manufacture of measuring and compensation inductors.

К **л** ю ч е в ы е с **л** о в а: схема замещения, ток некомпенсации, первичный вихретоковый преобразователь, информативный сигнал, относительная погрешность.

K e y w o r d s: equivalent circuit, the initial phase, the primary eddy current transducer, data signal, reduced error.

© Абрамов С. В., Ульянин Н. С., 2019

В настоящее время первичные вихретоковые преобразователи (ПВП), обладающие высокими метрологическими характеристиками и надежностью, применяются для бесконтактного измерения и контроля параметров перемещения объектов, работающих в жестких условиях эксплуатации в широком диапазоне температур. Функционирование ракетно-космической техники при криогенных температурах и в условиях термоударов предопределяет выбор именно ПВП при измерении частоты вращения, перемещений, вибраций, осевых и радиальных биений энергетических установок и топливных насосов ракетных двигателей. Достигнутые успехи в развитии микроэлектроники и информатики оказали большое влияние на системы вихретокового контроля и привели к появлению на базе микроконтроллеров интеллектуальных датчиков и автоматизированных систем управления с высокими метрологическими характеристиками.

Достаточно часто при работе ПВП рассматривают температуру как важнейший дестабилизирующий фактор, но помимо этого при использовании квазидифференциальных схем включения на выходной сигнал ПВП оказывает влияние неточность в изготовлении измерительной и компенсационной катушек.

На начальном этапе использования ПВП информативным параметром являлся модуль иммитанса (сопротивления или проводимости) двухполюсной электрической цепи. Модель ПВП представлялась в виде эквивалентной схемы замещения с одним элементом в виде модуля сопротивления Z или проводимости Y двухполюсной цепи. Измерение перемещений с использованием такой модели можно было осуществить относительно простыми измерительными цепями с преобразованием иммитанса в выходной ток или напряжение. На последующих этапах применения ПВП уменьшить указанные погрешности удалось путем представления эквивалентной схемы замещения в виде активной ReW и реактивной ImW – составляющих иммитанса и последующего преобразования информативного параметра двухэлементной схемы замещения. Двухполюсная эквивалентная схема замещения ПВП представлялась в виде соединения активного сопротивления R и индуктивности L. Для раздельного измерения информативных параметров R или L эквивалентной схемы замещения использовались измерительные цепи или вторичные преобразователи с фазочувствительными выпрямителями, что позволяло получить наибольший эффект при больших изменениях соотношений активной ReW и реактивной ImW составляющих иммитанса W [1].

В дальнейшем схема замещения измерительной катушки индуктивности усложнилась и стала представлять собой последовательное соединение начальной индуктивности с активной и реактивной составляющими вносимого электрического сопротивления, зависящего от измеряемого перемещения. Модуль полного вносимого электрического сопротивления зависит от перемещения, частоты питания ПВП и составляет 30–40 % от значения модуля начального полного электрического сопротивления модуля начального полного электрического сопротивления катушки индуктивности.

Для раздельного измерения информативных и неинформативных параметров и, соответственно, снижения температурной погрешности измерения автором предлагается на основе экспериментально снятых амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик измерительной катушки (рис. 1) с применением теории вычетов синтезировать двухэлементную схему замещения ПВП.



Рис. 1. Экспериментально снятые характристики измерительной катушки: a – аппроксимированные ЛАЧХ измерительной катушки $(1 - h = 0; 2 - h = \infty);$ δ – ЛФЧХ измерительной катушки $(1 - h = 0; 2 - h = \infty)$

Исходная и синтезированная схемы замещения ПВП представлены на рис. 2.



Рис. 2. Эквивалентные схемы замещения ПВП: *a* – исходная схема замещения ПВП; *б* – синтезированная схема замещения ПВП

Передаточная функция синтезированной схемы замещения имеет вид

$$Y(p) = \frac{k_o(T_1p+1)}{p(T_3p+1)} = \frac{I_{\text{BMX}}}{U_{\text{PX}}},$$

где Y(p) – комплексное значение проводимости; k_o – коэффициент усиления; T_1 и T_3 – постоянные времени; I_{Bbix} – ток на выходе измерительной катушки; U_{Bx} – напряжение, приложенное к обмоткам измерительной катушки.

Постоянные времени T_1 и T_3 , коэффициент усиления K_0 для эквивалентной схемы замещения, представленной на рис. 2,6, имеют следующий вид:

$$T_1 = \frac{L_0 + L_x}{R_x}; \ T_3 = \frac{L_x}{R_y}; \ K_0 = \frac{1}{L_0},$$

где L_0 – начальное значение индуктивности, создающей магнитный поток; L_x – вносимое значение индуктивности, зависящей от перемещения; R_x – вносимое значение активного сопротивления, зависящего от перемещения.

Синтезированная схема замещения состоит из параллельного соединения начальной индуктивности, создающей магнитный поток при номинальном измеряемом перемещении, и последовательного соединения вносимой индуктивности и вносимого сопротивления, зависящих от измеряемого перемещения.

Для устранения начальной индуктивности L_0 автором предлагается ввести дополнительную компенсационную катушку, расположенную соосно от измерительной катушки (рис. 3), и индуктивность которой L_k не изменяется от измеряемого перемещения. Точность компенсации будет зависеть от идентичности изготовления измерительной и компенсационной катушек.



Рис. 3. Дифференциальная схема включения измерительной и компенсационной катушек

В качестве исходных параметров модели в виде трехэлементной схемы замещения было принято: $L_0 = 4$ мкГн; $L_x = 10,9$ мкГн, $R_x = 31,5$ Ом; частота синусоидального напряжения

питания катушки индуктивности ПВП f = 1 МГц; амплитуда напряжения питания $U_{\text{пит}} = 5$ В. Параметры L_x и R_x для трехэлементной схемы замещения были определены пересчетом из двухэлементной схемы замещения, имеющей вносимое реактивное сопротивление $L_{\text{вн}} = 1,2$ мкГн (30 % от значения L_0), вносимое активное сопротивление $R_x = 2,5$ Ом (10 % от значения wL_0) [2]. Начальное значение индуктивности $L_0 = 4$ мкГн было рассчитано для катушки квадратного сечения, у которой количество витков n = 10, средний диаметр катушки d = 1 см, параметр $\Phi = 12,5$ (зависит от соотношений толщины и диаметра катушки [3]). В качестве выходного параметра контролировался ток на выходе дифференциальной измерительной цепи.

Целью данной статьи является проведение оценки влияния температурного воздействия на ПВП с учетом неполной компенсации неинформативного параметра и подтверждение обязательного требования идентичного изготовления измерительной и компенсационной катушек.

Схеме замещения, представленной на рис. 3, соответствует следующая система дифференциальных уравнений [4, 5]:

$$\begin{cases}
L_x \frac{dI}{dt} + R_x I = U_{\text{пит}}, \\
L_y \frac{dI}{dt} = U_{\text{пит}}, \\
L_k \frac{dI}{dt} = -U_{\text{пит}}, \\
I_y + I_y - I_k = \Delta I.
\end{cases}$$
(1)

Для повышения точности измерений и простоты вычислений значения индуктивностей были увеличены в 10^6 раз, а частота снижена в 10^6 раз.

Модель трехэлементной схемы замещения ПВП приведена на рис. 4, выходной ток ПВП, полученный по результатам моделирования, показан на рис. 5

Влияние температуры характеризуется изменением входных параметров. Для исследования температуры предположим, что параметры $L_{\mu}, L_{x}, R_{x}, L_{k}$ увеличены на 10 %. Как и в предыдущем случае, контролировался выходной ток (рис. 6) [6, 7].



Рис. 4. Модель трехэлементной схемы замещения ПВП без учета влияния температуры





Как уже было выше упомянуто в статье, изготовить две полностью идентичные катушки невозможно, поэтому помимо изменения параметров схемы замещения от температуры, проведем расчет выходных токов ПВП при условии неполной компенсации неинформативного параметра L_{μ} .

Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

			,	1 1	1	л н	
$\Delta I, A$				K_2			
		1,0	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1
	1,0	0,062	0,061	0,060	0,059	0,058	0,057
	1,02	0,061	0,059	0,058	0,056	0,054	0,053
K_1	1,04	0,060	0,058	0,056	0,054	0,052	0,050
	1,06	0,059	0,056	0,054	0,052	0,050	0,047
	1,08	0,058	0,054	0,052	0,049	0,046	0,044
	1,1	0,057	0,053	0,050	0,047	0,045	0,042

Результаты изменения тока ПВП от температуры (*k*₁) и от неполной компенсации неинформативного параметра *L*

Для того, чтобы численно оценить влияние температуры и неполной компенсации неинформативного параметра $L_{\rm H}$, необходимо оценить относительную погрешность по формуле

$$\delta_{i} = \frac{I_{\text{BbIX}(\text{HY})} - I_{\text{BbIX}(K_{1}K_{2})}}{I_{\text{BbIX}(K_{1}K_{2})}} | \cdot 100\%.$$
(3)

Таблица 2

δ_i , %				K_2			
		1,0	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1
	1,0	0	1,61	3,23	4,84	6,45	8,06
	1,02	1,61	4,84	6,45	9,68	12,9	14,52
K_1	1,04	3,23	6,45	9,68	12,9	16,13	19,35
	1,06	4,85	9,68	12,9	16,13	19,35	24,12
	1,08	6,45	12,9	16,13	20,97	20,97	29,03
	1,1	8,06	14,52	19,35	24,19	27,44	32,26

Результаты определения относительной погрешности.

Таким образом, используя квазидифференциальную схему включения, можно проводить измерение информативного параметра, зависящего только от перемещения, а неинформативный параметр компенсировать введением дополнительной компенсационной катушки. Разработанная модель, представленная на рис. 3, позволила помимо исследования температурной погрешности провести анализ влияния некомпенсации начальной индуктивности с учетом влияния температурного воздействия. Таблица 2 позволяет сделать вывод, что при совместном влиянии температуры и при неполной компенсации неинформативного параметра на 10 % относительная погрешность будет составлять 32,26 %. Из приведенных расчетов вытекает требование идентичности изготовления измерительной и компенсационной катушек.

Библиографический список

- 1. Семенов, А. Д. Идентификация объектов управления : учеб. пособие / А. Д. Семенов, Д. В. Артамонов, А. В. Брюхачев. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. 144 с.
- Эйкофф, П. Основы идентификации систем управления / П. Эйкофф. Москва : Наука, 1975.
- 3. *Соболев, В. С.* Накладные и экранные датчики / В. С. Соболев, Ю. М. Шкарлет. Новосибирск : Наука, 1967. – 144 с.
- Пат. 2487314 Российская Федерация. Вихретоковый преобразователь перемещений / В. П. Маланин, В. Н. Колганов, М. Д. Пресняков, С. В. Абрамов. – Опубл. 10.07.2013.
- 5. Неразрушающий контроль : справочник : в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Москва : Машиностроение, 2003. Т. 2. 688 с.
- Абрамов, С. В. Сравнительный анализ схем замещения первичных вихретоковых / С. В. Абрамов, В. П. Маланин // Приборы. – 2015. – № 9. – С. 20–27.
- 7. *Маланин, В. П.* Повышение информативной способности вихретоковых датчиков для бесконтактного измерения перемещений / В. П. Маланин, С. В. Абрамов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 4 (10). С. 76–81.

References

- Semenov A. D., Artamonov D. V., Bryukhachev A. V. *Identifikatsiya ob"ektov upravleniya:* ucheb. posobie [Identification of objects of control : tutorial]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2006, 144 p. [In Russian]
- Eykoff P. Osnovy identifikatsii sistem upravleniya [Basic identification of control systems]. Moscow: Nauka, 1975. [In Russian]
- Sobolev V. S., Shkarlet Yu. M. Nakladnye i ekrannye datchiki [Overhead and screen sensors]. Novosibirsk: Nauka, 1967, 144 p. [In Russian]

- Pat. 2487314 Russian Federation. Vikhretokovyy preobrazovatel" peremeshcheniy [Pat. 2487314 Russian Federation. Eddy current displacement transducer]. V. P. Malanin, V. N. Kolganov, M. D. Presnyakov, S. V. Abramov. publ. 10.07.2013. [In Russian]
- 5. *Nerazrushayushchiy kontrol': spravochnik: v 7 t.* [Non-destructive testing : Handbook : in 7 vol.]. General ed. V. V. Klyuev. Moscow: Mashinostroenie, 2003, vol. 2, 688 p. [In Russian]
- 6. Abramov S. V., Malanin V. P. Pribory [Instrumentation]. 2015, no. 9, pp. 20–27. [In Russian]
- Malanin V. P., Abramov S. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 4 (10), pp. 76–81. [In Russian]

Абрамов Сергей Владимирович

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

Ульянин Николай Сергеевич

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

Abramov Sergey Vladimirovich

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

Ul'yanin Nikolay Sergeevich

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

Образец цитирования:

Абрамов, С. В. Исследование влияния температурной погрешности вихретокового преобразователя перемещений с учетом влияния неполной компенсации неинформативного параметра / С. В. Абрамов, Н. С. Ульянин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 38–44. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-5.

С. Н. Медведева, В. И. Чернецов, М. В. Чернецов

ОТОБРАЖЕНИЯ ТИПОВЫХ СТРУКТУР ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ В СТРУКТУРЫ ОБОБЩЕННЫХ СИГНАЛЬНЫХ ГРАФОВ

S. N. Medvedeva, V. I. Chernetsov, M. V. Chernetsov

DISPLAY TYPICAL STRUCTURES OF MEASUREMENT CIRCUITS IN THE STRUCTURE OF THE GENERALIZED SIGNAL GRAPHS

Аннотация. Актуальность и цели. Объектом исследования являются измерительные цепи типовых объектов разной природы: физические и биологические объекты, цифроаналоговые преобразователи на основе поразрядных резистивных сеток, длинные линии связи, резистивно-емкостные датчики и др. Они отображаются с помощью обобщенных сигнальных графов (ОСГ), и их параметры рассчитываются графоаналитическими методами. Целью работы является уточнение классификации ОСГ для типовых структур измерительных цепей. Материалы и методы. В основе исследования использован топологический подход к изучаемым объектам и явлениям. Полученные результаты согласуются с основными положениями теории графов и алгебраических методов, позволяющих быстро получить математические выражения. Результаты. Исследованы различные объекты и их структуры в виде ОСГ. Выявлено, что в графах типовых измерительных схем часто встречаются повторяющиеся по топологии подграфы. Среди топологических структур как типовые элементы необходимо выделить звездообразные, кольцевые, меандровые и ленточные ОСГ. Получены уравнения для расчета параметров типовых измерительных схем. Выводы. Показано, что среди всех приведенных структур ОСГ особое место занимают ленточные ОСГ, которые можно рассматривать как наиболее универсальные типовые элементы, из которых могут быть сложены обобщенные сигнальные графы иных типов. Отображение структур измерительных цепей в виде ОСГ имеет практический интерес, поскольку они характеризуют реальные физические объекты и упрощают расчет их параметров, используя топологические формулы для типовых измерительных цепей.

A **b** s **t r** a **c t**. *Background*. The object of study is the measuring circuit of the model objects of different nature: physical and biological objects, digital-to-analog converters on the basis of bit-for-bit resistive nets, long lines of communication, a resistive-capacitive sensors etc. They are displayed by means of the generalized signal graph (GSG), and their parameters are calculated by the graphic-analytical methods. The aim of the work is to clarify the classification of GSG for typical structures of measuring circuits. *Materials and methods*. The study is based on the topological approach to the studied objects and phenomena. The results obtained are consistent with the basic provisions of graph theory and algebraic methods, allowing to quickly obtain mathematical expressions. *Results*. Various objects and their structures in the form of GSG are investigated. It is revealed that in the graphs the standard measurement schemes are often found repeated on the topology of the subgraphs. Among topological structures as standard elements it is necessary to allocate star-shaped, ring, meander and tape GSG. The equations for calculating the parameters of a typical measurement applications. *Conclusions*. It is shown that among all the above structures GSG occupy a special place tape GSG, which can be considered as the most universal typical elements, of which can be composed of generalized signal graphs

© Медведева С. Н., Чернецов В. И., Чернецов М. В., 2019

of other types. Displaying the structures of measuring circuits in the form of GSG is of practical interest because they characterize real physical objects and simplify the calculation of their parameters using topological formulas for typical measuring circuits.

Ключевые слова: измерительная цепь, эквивалентная схема замещения, обобщенный сигнальный граф.

K e y w o r d s: measuring circuit, the equivalent circuit of substitution, generalized signal graph.

При измерениях физических величин с использованием параметрических датчиков [1, 2], а также измерениях параметров физических объектов, свойства которых описываются электрическими схемами замещения в общем случае в виде многополюсных электрических цепей [3–5], число всевозможных структур измерительных цепей практически безгранично. Вместе с тем, даже не проводя специальных статистических исследований, достоверно можно утверждать, что существует достаточно ограниченный ряд типовых структур, которые встречаются наиболее часто и этот факт имеет вполне рациональные объяснения.

Во-первых, часто топологические особенности являются следствием действия фундаментальных физических принципов и проявления свойств физических объектов. Достаточно привести в качестве примера принцип симметрии, который подразумевает наличие некоторого центра, относительно которого располагаются элементы исследуемых систем. Такие системы в различных проекциях вполне логично отображаются звездообразными топологическими структурами. Другой пример – широко распространенное свойство изотропности предполагает равномерное распределение элементов (частиц, локальных областей) в пространстве. При этом исследуемые объекты в их сечениях отображаются последовательно расположенными однотипными элементами.

Во-вторых, математические модели для описания свойств физических объектов с целью экономизации описания и доказательства адекватности моделей часто представляются в виде типовых структур (звезды, кольца, ленты и т.п.).

В-третьих, в инженерной практике широко применяются типовые структуры, свойства которых изначально определяют свойства синтезируемого объекта. Например, принцип каскадного включения элементарных двухполюсных цепей в виде, например, ленточных структур [2, 4, 5] позволяет уменьшить номенклатуру комплектующих изделий, так как предполагает применение однотипных элементов или блоков.

Описание схем замещения потенциально токовыми (ПТГ) и обобщенными сигнальными (ОСГ) графами упрощает как анализ, так и синтез измерительных цепей, что является актуальной задачей.

Ниже рассматриваются типовые измерительные цепи и соответствующие им структуры ОСГ. При этом параллельно, в качестве еще одной цели параграфа, рассматриваются типовые задачи анализа измерительных цепей и методы их решения.

Дискретные электрические модели объектов различной природы

Для идентификации физических и биологических объектов используется описание свойств объекта в виде участка электрической цепи – пассивного или активного двухполюсника. Всевозможные схемы замещения в настоящее время подробно изучены и классифицированы. Рассмотрим наиболее широко применяемые схемы (формы) электрических цепей.

Формы Фостера включают в себя структуры двухполюсников, показанные на рис. 1,*а...г* [5].

Для измерения комплексного сопротивления Z одного из более сложных двухполюсников, приведенного на рис.1, c оставим соответствующие ему ПТГ и ОСГ, показанные на рис. 2, a и б. Рассматриваемый ОСГ характеризуется звездообразной топологией [5]. Его определитель описывается выражением

$$\Delta = \left[RC_0 p + 1 + \sum_{k=1}^{n} \frac{R_k C_0 p}{(R_k C_k p + 1)} \right] \cdot \prod_{i=1}^{n} (R_i C_i p + 1),$$
(1)

а искомое комплексное сопротивление

$$Z = \frac{E}{i_0} = \frac{\Delta}{C_0 p \prod_{i=1}^n (R_i C_i p + 1)} = R_0 + \frac{1}{C_0 p} + \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{(R_k C_k + 1)}.$$
 (2)

где E и i_0 – ЭДС и ток источника энергии, подаваемые на вход двухполюсника рис. 1,*г*.



Рис. 1. Канонические структуры двухполюсников в форме Фостера [5]



Рис. 2. Схема ПГТ(a) и ОСГ(b) для двухполюсника Фостера рис. 1,c

В качестве другого примера рассмотрим схему для измерения комплексного сопротивления Z двухполюсника, представленного на рис.1, в. Соответствующие ПТГ и ОСГ приведены на рис. 3. В данном случае используется схема с токовым питанием измерительной цепи. Для определителя и комплексного сопротивления будут верны выражения

$$\Delta = \left[R_0 C_0 p + 1 + \sum_{k=1}^n \frac{R_0 C_k p}{\left(R_k C_k p + 1\right)} \right] \cdot \prod_{i=1}^n \left(R_i C_i p + 1\right), \tag{3}$$

$$Z = \frac{U_0}{I} = \frac{R_0}{R_0 C_0 p + 1 + \sum_{k=1}^n \frac{R_0 C_k p}{R_k C_k p + 1}}.$$
(4)



Рис. 3. Схема ПТГ (а) и ОСГ (б) для двухполюсника Фостера рис. 1, в

Последнее выражение, если представить анализируемый параметр через комплексную проводимость

$$Y = \frac{1}{Z} = C_0 p + \frac{1}{R_0} + \sum_{k=1}^{n} \frac{C_k p}{\left(R_k C_k p + 1\right)},$$
(5)

по структуре практически повторяет формулу (2), что объясняется параллельным включением R_iC_i -цепочек. Это же свойство отображается и в звездообразной топологии ОСГ (см. рис. 3, δ).

Таким образом, двухполюсникам со структурой в форме Фостера свойственна звездообразная структура ОСГ. Но такая закономерность типична лишь в случае, если в двухполюсник не вводятся искусственно некоторые дополнительные элементы.

Формы Кауэра представляются структурами двухполюсников, примеры которых показаны на рис. 4,*a*...*г* [5].

Рассмотрим пример определения комплексного сопротивления Z со структурой рис. 4,*a*. Соответствующие ПТГ и ОСГ приведены на рис. 5. В данном случае возникают определенные сложности при записи в общем виде выражений для Δ и Z. Используя формулу разложения по вершине [6], для искомых параметров можно записать

$$\Delta = C_1 p \Delta_{G1R} + \Delta_{G2C} = C_1 p \Delta_{G1R} + C_2 p \Delta_{G2R} + C_3 p \Delta_{G3R} + \dots + C_n p R_n;$$
(6)

$$Z = \frac{U_1}{I} = \frac{1}{\Delta} \{ R_1 \Delta_{G2C} + R_2 \Delta_{G3C} + \dots + R_n \},$$
(7)

где Δ_k – определитель части ОСГ, не касающегося *k*-го контура, т.е. контур может начаться с вершины $R_1, C_2, R_2, C_3, ..., k = 1,...,n, n$ – количество однотипных элементов в схеме 4,*a* (см. рис. 5,*б*).



Рис. 4. Канонические структуры двухполюсников в форме Кауэра



б)



Из рассмотренного примера видно, что структуры Кауэра характеризуются ленточными графами, которые не приводятся к удобным для анализа формам Фостера.

Рассмотрим примерные структуры ОСГ для анализа других типовых измерительных цепей.

Измерительные схемы ЦАП на основе поразрядных резистивных сеток

Как известно [7], цифроаналоговые преобразователи (ЦАП), которые строятся на основе поразрядных резистивных сеток, характеризуются каскадным включением разрядов. В данном отношении соответствующие схемы и особенно однородные обобщенные сигнальные графы должны быть близки по свойствам к схемам двухполюсников в форме Кауэра. Отличие, очевидно, заключается в том, что формально при работе ЦАП мы имеем изменяемую структуру, но, что весьма существенно, однородный ОСГ остается неизменным. Следовательно, анализ свойств ЦАП, используя графоаналитические методы, существенно упрощается по сравнению с анализом традиционными методами электротехники.

49

Проиллюстрируем сказанное на примере методики анализа погрешностей ЦАП, построенного на R-2R сетке с токовыми источниками активного входного воздействия (см. рис. 6,*a*). При этом будем использовать известный метод автономного источника [6, 9].



Рис. 6. Схема ЦАП (а) и соответствующий ей ОСГ (б)

Решим задачу оценки влияния изменений сопротивлений резисторов на информативные параметры выходных сигналов электрических цепей путем приведения линейного резистора с изменяющимися параметрами к автономному двухполюснику [6, с. 205]. Такое приведение осуществляется путем дифференцирования исходного уравнения $U_k = R_k I_k$ или $I_k = Y_k U_k$, которое после перехода к конечным приращениям дает $U_k = R_k i_k + e_{Rk}$ или $i_k = Y_k U_k + i_{Yk}$, где $e_{Rk} = i_k \cdot \Delta R_k$, $i_{Yk} = U_k \cdot \Delta Y_k$. При этом значения тока i_k и напряжения U_k предполагаются известными из расчета, проводимого в статическом режиме при $\Delta R_k = 0$ и $\Delta Y_k = 0$.

Структура измерительной цепи ЦАП (рис. 6,*a*) представлена, как и структуры Кауэра, ленточным графом, который соответствует ОСГ, приведенному на рис. 6,*б*. При построении ОСГ принято: $I_k = I$, k = 1,2,3,4; $R_k = R$, k = 1,2,...,8, и значения коэффициентов передачи ключей $S_k = 0 \lor 1$, k = 1, 2, 3, 4. Значения весов вершин соответствуют их идеальным значениям при отсутствии погрешностей. Токовые вершины отмечены соответствующими им токами, а потенциальные – через потенциалы точек 1, 2, 3 и 4, указанных на схеме рис. 6,*a*. В идеальном случае определитель ОСГ имеет значение

$$\Delta = \left[\left(\frac{R}{R} + 1\right) \left(\frac{R}{2R} + 1\right) + \frac{R}{R} \right] \cdot \left[\left(\frac{R}{2R} + 1\right) \left(\frac{2R}{2R} + 1\right) + 1 \right] + \left[\frac{2R \cdot R}{2R} + R + 2R \right] \left[\frac{R}{R \cdot 2R} + \frac{1}{2R} + \frac{1}{R} \right] = 24, \qquad (8)$$

а выходной ток (информативный параметр) описывается выражением

$$i_{\text{BEX}} = \frac{I}{24} \{ S_1 + 2S_2 + 4S_3 + 8S_4 \}, \tag{9}$$

где в фигурных скобках обозначен коэффициент передачи соответствующего ключа, равный либо 0, либо 1.

Для оценки влияния на ток $i_{\text{вых}}$ изменений межразрядных резисторов R_2 , R_3 и R_4 запишем уравнения, описывающие идеальные значения токов, протекающих через эти резисторы [5, с. 22]:

$$i_{2} = \frac{I}{24} \{ 8S_{1} - 8S_{2} - 4S_{3} - 2S_{4} \};$$

$$i_{3} = \frac{I}{24} \{ 4S_{1} + 8S_{2} - 8S_{3} - 4S_{4} \};$$

$$i_{4} = \frac{I}{24} \{ 2S_{1} + 4S_{2} + 8S_{3} - 8S_{4} \}.$$
(10)

Влияние изменений значений резисторов обозначим через соответствующие изменения ЭДС, представленные в ОСГ вершинами-истоками $e_2 = i_2 \cdot \Delta R$, $e_3 = i_3 \cdot \Delta R$ и $e_4 = i_4 \cdot \Delta R$, которые показаны на рис. 6,6 пунктиром. С учетом (10) легко определить абсолютные погрешности, приведенные к выходу, т.е. получаемые делением на коэффициент передачи ЦАП, равный 24:

$$\Delta i_{\text{BEXX}}^{<2>} = \frac{I}{24^2} \cdot \frac{\Delta R}{R} \{ 8S_1 - 8S_2 - 4S_3 - 2S_4 \};$$

$$\Delta i_{\text{BEXX}}^{<3>} = \frac{I}{24^2} \cdot \frac{\Delta R}{R} \{ 4S_1 + 8S_2 - 8S_3 - 4S_4 \};$$

$$\Delta i_{\text{BEXX}}^{<4>} = \frac{I}{24^2} \cdot \frac{\Delta R}{R} \{ 2S_1 + 4S_2 + 8S_3 - 8S_4 \}.$$
(11)

Таким образом, по ОСГ достаточно просто можно оценить как параметры ИЦ, так и погрешности, вызванные изменением резисторов ЦАП.

Дискретные схемы замещения длинных линий связи

При анализе электрических цепей с распределенными параметрами в электротехнике используется прием представления участков таких цепей в виде дискретных моделей, например, схемы замещения линий электропередач в электроэнергетике. Длинная линия может быть представлена схемой замещения рис. 7,*a* [8, с. 419], где R_0 – продольное активное сопротивление единицы длины линии, L_0 – индуктивность единицы длины линии, C_0 – емкость единицы длины линии и G_n – поперечная проводимость единицы длины линии.

Данный пример показывает случай, когда схема замещения состоит из бесконечного числа дискретных элементов. Ее описание осуществляется аналитически в виде асимптотических дифференциальных уравнений [8]. Вместе с тем, используя топологические методы анализа, имеется возможность построения схем замещения электрических цепей с распределенными параметрами в виде схем, содержащих конечное число дискретных элементов.

Общая идея предлагаемого подхода заключается в том, что схема длинной линии связи отображается в виде звеньев ОСГ, которые соответствуют элементарному звену dx рассматриваемой длинной линии связи.

Для изображенной на рис. 7, a схемы замещения элементарного звена соответствующие ПТГ и ОСГ имеют вид, показанный на рис. 7, b и e соответственно. ОСГ, изображенный на рис. 7, e, имеет топографическую структуру в виде меандрового ОСГ.

В соответствии с целями обзора для нас существенно, что ОСГ, отражающий длинную линию связи, может быть представлен ленточным графом. Действительно, если воспользоваться методом исключения висячих вершин $L_0 pdx$ и $R_n dx$ (что, по сути, соответствует объединению последовательных и параллельных элементов), то ОСГ рис. 7,*в* будет представляться в виде рис. 8.



Рис. 7. Схема замещения длинной линии связи (*a*) и соответствующие ей ПТГ (*б*) и ОСГ (*в*)



Рис. 8. ОСГ для схемы замещения элементарного звена длинной линии

Дискретные схемы замещения для резистивно-емкостных датчиков

В общем случае для описания схемы замещения резистивно-емкостного датчика (РЕД) [10] требуется применять методы электродинамики – уравнения Максвелла. Альтернативой этому может служить использование дискретных схем замещения, в которых звенья с распределенными параметрами заменяются рядом RC-цепочек. Например, если учитывать только влияние емкости связи C_c , то схему замещения можно представить в виде рис. 9,*a*, где представлен случай включения РЕД в виде «потенциометрического» делителя.

На рисунке приняты следующие обозначения: R_{n} и R_{n} – сопротивления РЭ слева и справа от ПЭ; $R_{\Pi 9}$ – сопротивление участка РЭ под подвижным элементом. Соответствующие рассматриваемой схеме ПТГ и ОСГ показаны на рис. 9,6 и в соответственно. Получаемый для рассматриваемой измерительной схемы однородный ОСГ имеет форму кольца, но в данном графе можно выделить подграфы, например, подграф G^* , которые представляют собой ленточные графы.

Анализ дискретных схем пассивных линий задержки [11] показал, что граф, соответствующий схеме замещения многозвенной линии задержки, по сути, превращается в ленточный обобщенный сигнальный граф.

Рассматривая обобщенные сигнальные графы, которые соответствуют типовым измерительным схемам, можно сделать вывод о том, что в графах часто встречаются повторяющиеся по топологии подграфы. Среди таких топологических структур, как типовые элементы, необходимо выделить:

- звездообразные ОСГ (см. рис. 2,6; рис. 3,6);
- кольцевые ОСГ (см. рис. 9,*в*);
- меандровые ОСГ (см. рис. 7,*в*);
- ленточные ОСГ (см. рис. 5, б, б, б).



Рис. 9. Дискретная схема замещения РЕД (a) и соответствующие ей ПТГ (δ) и ОСГ (a)

Для пассивных измерительных цепей рассматриваемые ОСГ характеризуются тем, что весовые коэффициенты дуг принимают значения ±1. В этом плане все их можно называть единичными.

Следует подчеркнуть, что не все структуры взаимно трансформируемы. Только меандровый ОСГ можно преобразовать в ленточный (путем исключения висячих вершин или подграфов). Звездообразный ОСГ можно преобразовать в кольцевой (путем исключения центральной вершины). Но если в первом случае ОСГ остается единичным, то при преобразовании «звезда-кольцо» появляются дуги с весами, отличными от ±1.

Среди всех приведенных типов ОСГ особое место занимают ленточные ОСГ, которые можно рассматривать как наиболее универсальные типовые элементы (домены), из которых могут быть сложены обобщенные сигнальные графы иных типов.

Следует отметить, что отображение структур измерительных цепей в виде ОСГ имеет практический интерес, поскольку они характеризуют реальные физические объекты (МДП-

структуры, линии сверхвысокого напряжения, датчики, преобразователи и т.п.) и упрощают расчет их параметров, используя топологические формулы для типовых измерительных цепей.

Библиографический список

- Датчики : справочное пособие / В. М. Шарапов, Е. С. Полищук, Н. Д. Кошевой, Г. Г. Ишанин, И. Г. Минаев, А. С. Совлуков ; под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. – Москва : Техносфера, 2012. – 624 с.
- Мартяшин, А. И. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / А. И. Мартяшин, К. Л. Куликовский, С. К. Куроедов, Л. В. Орлова. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 261 с.
- 3. *Чернецов, М. В.* Применение фазочастотных характеристик для идентификации схем замещения параметрических датчиков / М. В. Чернецов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 2 (24). С. 26–33.
- Добровинский, И. Р. Структурно-параметрическая идентификация физических процессов в виде двухполюсников / И. Р. Добровинский, А. И. Кислов, А. С. Кибиткин, С. Б. Шахов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 1. – С. 26–34.
- 5. *Медведева, С. Н.* Анализ и синтез измерительных цепей датчиков с распределенными параметрами : дис. ... канд. техн. наук / Медведева С. Н. Пенза, 2002. 213 с.
- 6. *Анисимов, В. И.* Топологический расчет электронных схем / В. И. Анисимов. Ленинград : Энергия, 1977. – 240 с.
- 7. Сапельников, В. М. Функциональные цифроаналоговые преобразователи и их роль в развитии приборостроения / В. М. Сапельников // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 1 (7). С. 4–14.
- Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – 9-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высш. шк., 1996. – 638 с.
- Использование топологических графов для расчета схем узлов средств измерений на операционных усилителях и анализа их погрешностей / И. Р. Добровинский, Е. А. Ломтев, Ю. Т. Медведик, П. М. Стеблев, А. А. Трофимов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 139–147.
- Чернецов, М. В. Унифицирующие измерительные преобразователи физических величин на базе резистивно-емкостных датчиков : дис. ... канд. техн. наук / Чернецов М. В. – Пенза : ПГУ, 2001. – 215 с.
- 11. *Медведева, С. Н.* Моделирование линий задержки посредством обобщенных сигнальных графов / С. Н. Медведева, В. Д. Михотин, В. И. Чернецов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2006. Т. 1. С. 302–303.

References

- Sharapov V. M., Polishchuk E. S., Koshevoy N. D., Ishanin G. G., Minaev I. G., Sovlukov A. S. *Datchiki: spravochnoe posobie* [Sensors : reference guide]. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 624 p. [In Russian]
- 2. Martyashin A. I., Kulikovskiy K. L., Kuroedov S. K., Orlova L. V. *Osnovy invariantnogo preobrazovaniya parametrov elektricheskikh tsepey* [Bases of invariant transformation of parameters of electric circuits]. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 261 p. [In Russian]
- 3. Chernetsov M. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 2 (24), pp. 26–33. [In Russian]
- Dobrovinskiy I. R., Kislov A. I., Kibitkin A. S., Shakhov S. B. *Izmerenie. Monitoring. Up-ravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2012, no. 1, pp. 26–34. [In Russian]
- 5. Medvedeva S. N. Analiz i sintez izmeritel'nykh tsepey datchikov s raspredelennymi parametrami: dis. kand. tekhn. nauk [Analysis and synthesis of sensor measuring circuits with distributed parameters : dis. ... cand. of techn. sciences]. Penza, 2002, 213 p. [In Russian]
- 6. Anisimov V. I. *Topologicheskiy raschet elektronnykh skhem* [Topological calculation of electronic circuits]. Leningrad: Energiya, 1977, 240 p. [In Russian]
- 7. Sapel'nikov V. M. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 1 (7), pp. 4–14. [In Russian]

- 8. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektricheskie tsepi* [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuit]. 9th ed., rev. and updated. Moscow: Vyssh. shk., 1996, 638 p. [In Russian]
- Dobrovinskiy I. R., Lomtev E. A., Medvedik Yu. T., Steblev P. M., Trofimov A. A. *Izvesti-ya vysshikh uchebnykh zavedeniy*. *Povolzhskiy region*. *Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2011, no. 1 (17), pp. 139–147. [In Russian]
- 10. Chernetsov M. V. Unifitsiruyushchie izmeritel'nye preobrazovateli fizicheskikh velichin na baze rezistivno-emkostnykh datchikov: dis. kand. tekhn. nauk [Unifying measuring converters of physical quantities on the basis of resistive-capacitive sensors : dis. ... cand. of techn. sciences]. Penza: PGU, 2001, 215 p. [In Russian]
- 11. Medvedeva S. N., Mikhotin V. D., Chernetsov V. I. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2006, vol. 1, pp. 302–303. [In Russian]

Медведева Светлана Николаевна

кандидат технических наук, доцент, кафедра электроэнергетики и электротехники, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: sn-medvedeva@yandex.ru

Чернецов Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор, кафедра прикладной и бизнес-информатики, Пензенский казачий институт технологий (филиал) Московского государственного университета технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет) (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 6) E-mail: chvi.fortuna@mail.ru

Чернецов Михаил Владимирович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технического управления качеством, Пензенский государственный технологический университет (Россия, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1a/11) E-mail: kafedratuk@yandex.ru

Medvedeva Svetlana Nikolaevna

candidate of technical sciences, associate professor, sub-department of electric power and electrical engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Chernetsov Vladimir Ivanovich

doctor of technical sciences, professor, sub-department of applied and business informatics, Penza Cossack Institute of Technology (branch) of the Moscow State University of Technology and Management named after K. G. Razumovsky (First Cossack University) (6 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Chernetsov Mikhail Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor, head of sub-department of technical quality management, Penza State Technological University (1a/11 Baydukova passage/Gagarin street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Медведева, С. Н. Отображения типовых структур измерительных цепей в структуры обобщенных сигнальных графов / С. Н. Медведева, В. И. Чернецов, М. В. Чернецов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 45–55. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-6.

В. В. Кикот, И. Н. Чебурахин, Г. А. Кошкин, В. С. Волков, В. Г. Андреев

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ С ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ БЕССВИНЦОВОЙ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ

V. V. Kikot, I. N. Cheburakhin, G. A. Koshkin, V. S. Volkov, V. G. Andreev

HIGH-TEMPERATURE PIEZOELECTRIC PRESSURE SENSOR WITH IMPROVED SENSITIVITY BASED ON LEAD-FREE POWER-CERAMICS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Целью исследования является анализ влияния легирующих элементов на пьезоэлектрический модуль и удельное электрическое сопротивление высокотемпературной бессвинцовой керамики системы титаната-ниобата висмута (THB) при изготовлении чувствительных элементов пьезоэлектрических датчиков давления. Материалы и методы. Изготовлены макеты пьезоэлементов, легированные хромом, гадолинием и молибденом. Определен характер зависимости электрофизических характеристик THB от содержания легирующих элементов. Результаты. Выдвинуты предположения о механизмах влияния легирующих добавок на электрофизические свойства пьезомодуль материала, введение молибдена позволяет повысить высокотемпературное удельное электрическое сопротивление THB, скомпенсировав при этом падение сопротивления, вызванное введением хрома при сохранении повышенного пьезомодуля. Выводы. Введение хрома и молибдена позволяет вдвое увеличить коэффициент преобразования пьезоэлектрического датчика за счет увеличения пьезомодуля d_{33} при сохранении рабочей температуры не менее 700 °C.

A b s t r a c t. *Background*. The object of the research is determining of influence of dopants on piezoelectric coefficient and electrical resistivity of high-temperature titanate-niobate bismuth lead-free ceramics for piezoelectric pressure sensors. *Materials and methods*. The prototypes of piezoelectric elements doped with chromium, gadolinium and molybdenum are made. The kind of dependence for electro physical parameters of titanate-niobate bismuth ceramic of dopant content is established. *Results*. The assumption about influence ways of dopants on titanate-niobate bismuth ceramic properties are made. It's shown that chromium implantation allows increasing piezoelectric coefficient and molybdenum implantation leads to material electrical resistivity increasing and allows compensating electrical resistivity degradation caused by implantation of chromium. *Conclusions*. The implantation of chromium and molybdenum allows to double transformation coefficient of piezoelectric sensor by increasing piezoelectric coefficient of piezoelectric sensor by increasing piezoelectric coefficient of piezoelectric sensor by increasing piezoelectric sensor by incr

К л ю ч е в ы е с л о в а: пьезоэлектрический датчик давления, чувствительный элемент, пьезоэлемент, бессвинцовая пьезокерамика, пьезоэлектрический модуль, удельное электрическое сопротивление, титанат-ниобат висмута.

K e y w o r d s: piezoelectric pressure sensor, sensing element, piezoelectric element, leadless piezoceramic, piezoelectric coefficient, electrical resistivity, titanate-niobate bismuth.

© Кикот В. В., Чебурахин И. Н., Кошкин Г. А., Волков В. С., Андреев В. Г., 2019

При измерении параметров динамических процессов в энергетических установках с использованием информационно-управляющих систем самое широкое применение находят пьезоэлектрические преобразователи информации. Применение пьезоэлектрических первичных преобразователей в автоматических системах позволяет контролировать акустические и быстропеременные давления, ускорения, усилия, вибрации, удары, объемный и массовый расход, уровень и другие механические величины, напрямую связанные с важнейшими параметрами сложных процессов в широком диапазоне воздействия температур и других дестабилизирующих факторов.

По сравнению с измерительными преобразователями, основанными на других физических принципах, пьезоэлектрические преобразователи имеют относительно простую конструкцию, широкий частотный и динамический диапазоны, малые габариты и вес, высокую надежность и малую инерционность, не требуя при этом подведения энергии извне.

Развитие ряда отраслей промышленности, таких как космическая, авиационная, атомная энергетика, нефтепереработка и др., поставило задачу измерения динамических и импульсных давлений в экстремальных условиях эксплуатации, что привело к созданию специальных классов пьезоэлектрических датчиков вибрации, акустических и быстропеременных давлений [1, 2].

Постоянно возрастают требования к стойкости датчиков давлений в условиях внешних воздействий, в частности, при работе в области высоких температур [3–9]. Измерение параметров двигательных установок требует датчиков быстропеременных давлений и вибраций, работоспособных при температурах 600–700 °C. Известны технические решения пьезоэлектрических датчиков с чувствительными элементами на основе ниобата лития, работоспособные до температуры 700 °C [10]. Сравнительный анализ технических характеристик серийных датчиков пульсаций давления и динамических давлений показывает, что среди них отсутствуют малогабаритные высокоточные пьезоэлектрические датчики, работоспособные при воздействии температур до 700 °C (без принудительного охлаждения) [3, 4, 6].

При этом известные технические решения высокотемпературных пьезоэлектрических датчиков давлений характеризуются низкой чувствительностью, обусловленной в свою очередь низким значением пьезомодуля. Таким образом, актуальной задачей является повышение пьезочувствительности при сохранении работоспособности датчика в области повышенных температур.

Датчики пульсаций давления или датчики быстропеременных давлений предназначены для измерения динамических давлений на фоне медленно меняющихся статических давлений. Конструкция пьезоэлектрического датчика быстропеременных давлений включает первичный измерительный преобразователь, который, в свою очередь, содержит пьезоэлемент, имеющий, как правило, форму диска. Именно материал, из которого изготовлен пьезоэлемент, определяет чувствительность или коэффициент преобразования датчика.

Наибольшее распространение при производстве пьезоэлементов для датчиков динамических давлений получила пьезокерамика системы цирконата-титаната свинца (ЦТС), которая характеризуется высоким значением пьезомодуля d_{33} (порядка 200...300 пКл/Н), но при этом имеет относительно низкую температуру точки Кюри, не превышающую 350 °C. Несмотря на то, что в настоящее время ведутся работы по повышению стабильности электрофизических характеристик путем изменения технологических режимов изготовления и модификации состава ЦТС-пьезоматериалов, применение пьезоэлектрических датчиков для высокотемператрных измерений требует исследования и создания высокотемпературных пьезоматериалов [11, 12].

Краткий список материалов, используемых для производства высокотемпературных пьезоэлементов, приведен в работе [13]. Отмечается, что с ростом температуры точки Кюри T_c , которая в свою очередь определяет максимальную рабочую температуру, происходит значительное снижение пьезочувствительности, характеристикой которой является пьезомодуль d_{33} .

Наибольшим значением температуры точки Кюри обладает керамика на основе титаната-ниобата висмута Bi_3TiNbO_9 (THB). В зависимости от марки материала значение T_C находится в промежутке от 870 до 970 °C. Это означает, что возможно практическое использование материалов этой системы для производства чувствительных элементов с рабочей

температурой порядка 700 °С. При этом указывается, что для материалов системы ТНВ с $T_{C} = 908 \pm 5 \,^{\circ}\text{C}$ были получены значения d_{33} до 22 пКл/Н (16 после термостабилизации при 700 °С). Полученные результаты согласуются с другими работами в этой области [14], однако неясным является, за счет чего были получены достаточно высокие для высокотемпературного пьезоматериала пьезоэлектрические характеристики. Также важной проблемой керамики системы ТНВ является недостаточное сопротивление при высоких температурах, приводящее к пробою диэлектрика.

Таким образом, повышение электрофизических характеристик (пьезоэлектрического модуля, и электрического сопротивления при высоких температурах) бессвинцовой керамики системы ТНВ посредством введения легирующих элементов, является актуальной научнотехнической задачей.

Для решения поставленной задачи для легирования системы THB были использованы хром, молибден и гадолиний, вводимые в исходный материал в виде оксидов Cr₂O₃ и Gd₂O₃, а также молибденовой кислоты H₂MoO₄. Основу керамики составили оксиды висмута Bi₂O₃, титана TiO₂ и ниобия Nb₂O₅. Все исходные материалы имели средний размер частиц в пределе от 3 до 5 мкм и содержание основного компонента – не менее 99,99 мас. %.

Для получения пьезокерамических элементов применялась стандартная технология, включающая в себя смешение, первичный помол и синтез пьезокерамического порошка, за которыми следовали вторичный помол, введение временного связующего, формование и спекание. Спеченные, отшлифованные и металлизованные образцы были поляризованы.

Базовый химический состав керамики в ходе эксперимента оставался постоянным и соответствовал стехиометрии Bi₃TiNbO₉. При этом введение легирующих элементов производилось сверх стехиометрии перед первичным или вторичным помолом исходных компонентов. Рассмотрение только одного состава, содержащего оксид гадолиния, обусловлено тем, что его введение не обеспечивало значительных преимуществ по сравнению с другими легирующими элементами.

Оптимальная температура спекания сформованных изделий в значительной мере зависела от вводимых легирующих добавок. Введение оксида хрома и молибденовой кислоты перед синтезом не сказывалось на требуемой температуре синтеза и спекания. Введение оксида гадолиния перед синтезом приводило к выкрашиваниям на поверхности синтезированных образцов при механической обработке вне зависимости от температуры спекания. Это явление можно объяснить образованием при синтезе легкоплавкой фазы, которая приводила к интенсивному росту зерен ТНВ. Поэтому введение оксида гадолиния осуществлялось перед вторым помолом, а режим спекания был адаптирован таким образом, чтобы предотвратить рост зерна керамики: при предполагаемой температуре максимального роста зерна (800 °C) производилась выдержка в течение 3 ч.

Оптимальная напряженность электрического поля, в котором производилась поляризация керамики, определялась эмпирически в ходе эксперимента по зависимости пьезоэлектрического модуля от напряженности. В процессе поляризации осуществлялся также косвенный качественный контроль высокотемпературного сопротивления пьезокерамики. Для этого производилось измерение времени, в течение которого достигается заданное напряжение на контактах поляризатора. Длительный набор напряжения в данном случае свидетельствует о сравнительно низком сопротивлении образца и большом количестве свободных носителей заряда.

После поляризации проводилось определение основных электрофизических характеристик пьезокерамического материала: пьезомодуля, электрической емкости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Тангенс диэлектрических потерь для образцов всех исследованных составов составлял менее 0,001, что косвенно свидетельствует о сегнетожесткости керамики системы ТНВ вне зависимости от состава легирующих компонентов и согласуется с данными [13].

Влияние легирующих элементов на основные рассматриваемые параметры керамики: пьезоэлектрический модуль d_{33} и время набора заданного напряжения при поляризации t, характеризующего высокотемпературного сопротивление, приведено в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика	Концентрация легирующих компонентов, мас. %							
	Cr ₂ O ₃			H_2MoO_4				Gd_2O_3
	0	0,25	0,3	0,4	$0,3 + Cr_2O_3$	$0,1 + Cr_2O_3$	$0,05 + Cr_2O_3$	0,5
<i>d</i> ₃₃ , пКл/Н	4,58	6,97	9,3	2,35	3,06	8,82	9,82	7,27
ρ, ГОм∙м	21	26	29	2150	2130	2100	2070	19
<i>t</i> , c	29	25	25	1,5	1,5	1,5	2	30

Результаты эксперимента.

Введение оксида хрома приводит к росту как пьезоэлектрического модуля, так и времени набора заданного напряжения при поляризации. При этом увеличение содержания оксида хрома в три раза не приводит к пропорциональному изменению характеристик, из чего можно заключить, что существует некоторая минимальная концентрация оксида хрома в материале, при которой происходит скачкообразное изменение характеристик.

При анализе механизма влияния ионов хрома на пьезомодуль и высокотемпературное сопротивление следует исходить из того, что оксид хрома (III) является химически стабильным и тугоплавким соединением (температура плавления T_{nn} . превышает 2300 °C). Из этого следует низкая вероятность возможности его растворения в кристаллической решетке THB с образованием твердых растворов замещения. Если предположить, что определенное количество трехвалентного иона хрома растворимо в THB, то наиболее вероятным будет замещение в кристаллической решетке ионов ниобия Nb⁵⁺, обладающих близким ионным радиусом. Это предположение позволяет объяснить дискретный характер зависимости электрофизических характеристик от содержания оксида хрома, однако по аналогии с ЦТС замещение иона с большим зарядом на ион с меньшим зарядом должно приводить к снижению пьезоэлектрического модуля и росту сопротивления [15]. Поэтому определение истинного механизма влияния хрома на электрофизические характеристики пьезокерамики требует дополнительных исследований.

Наибольший интерес в рамках настоящей работы представляют результаты, полученные для материалов, модифицированных молибденовой кислотой. При содержании H_2MoO_4 0,5 мас. % наблюдается резкое снижение пьезомодуля и рост высокотемпературного сопротивления, выражающийся в ускорении набора требуемого напряжения при поляризации. Снижение содержания молибдена приводит к росту пьезоэлектрических характеристик, но не сказывается на высокотемпературном сопротивлении. Если проводить аналогию с введением хрома и гадолиния, то влияние молибдена на сопротивление имеет дискретный характер, в то время как зависимость пьезомодуля от содержания Мо имеет в первом приближении линейный характер. При той концентрации молибдена, при которой практически не наблюдается его влияние на пьезоэлектрический модуль, все еще имеет место скачкообразный рост сопротивления в сравнении с чистым THB. Механизм резкого роста сопротивления при введении молибдена остается неясным. Снижение пьезоэлектрического модуля с ростом содержания молибдена остается неясным. Снижение пьезоэлектрического модуля с ростом содержания молибдена и полобдена и с истым THB. Механизм резкого роста сопротивления при введении молибдена можно объяснить образованием ограниченных твердых растворов замещения, обладающих повышенной константой анизотропии кристаллической решетки, что приводит к затруднению поляризации поликристаллического материала.

Следовательно, наилучший результат показало совместное легирование THB молибденом и хромом концентрацией 0,05 мас. % H_2MoO_4 и 0,3 мас. % Cr_2O_3 соответственно, что позволяет получить максимальное значение пьезомодуля d_{33} равное 9,82 пКл/Н и практически максимально возможное удельное электрическое сопротивление $\rho = 2070 \ \Gamma OM \cdot M$.

Модель высокотемпературного пьезоэлектрического датчика с пьезоэлементом на основе ТНВ представлена в виде структурной схемы и приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема пьезодатчика

Если диапазоны измеряемого давления удалены от значения резонансной частоты пьезодатчика, то его схему замещения можно представить в виде, приведенном на рис. 2.



Рис. 2. Схема замещения пьезодатчика

Согласно структурной схеме измеряемое давление ΔP воспринимается мембраной и через силопередающий элемент с силой, пропорциональной измеряемому акустическому давлению, воздействует на рабочий пьезоэлемент пьезодатчика. Вследствие деформации пьезоэлемента на его электродах возникает поверхностный электрический заряд $q_{\Pi 3}$, который через кабельную перемычку поступает на выход пьезодатчика (на вход преобразователя информативных параметров) [1].

Если ΔP изменяется по гармоническому закону с частотой *f*, значение которой ниже частоты резонанса пьезодатчика, то коэффициент преобразования измеряемого акустического давления в выходной сигнал можно записать в виде [1]

$$K_{\Delta P} = \frac{U}{\Delta F} = \frac{q_{\Pi \Im} (\Delta F) R \omega}{\Delta F \sqrt{1 + C^2 R^2 \omega^2}},$$
(1)

где U – значение выходного сигнала пьезодатчика (на входе вторичного преобразователя информативных параметров пьезодатчика); $\Delta F = S_{3\phi\phi}\Delta P$ – сила воздействующая на пьезоэлемент; $S_{3\phi\phi} = \pi \left(\frac{r+r_0}{2}\right)^2$ – эффективная площадь мембраны; r – радиус мембраны; r_0 – радиус силопередающего элемента; $q(T) = d_{33}(T)\frac{L_3}{L_0}F$ – заряд, генерируемый пьезоэлементом; d_{33} – пьезочувствительность пьезоэлемента; S_{IT3} – площадь электродов пьезоэлемента; S_0 – площадь приложения силы ΔF_A ; $C = C_{IT3} + C_K + C_{BII}$ – электрическая емкость пьезодатчика; $C_{IT3} = \epsilon_{33}\frac{S_{IT3}}{h_{IT3}}$, C_K , C_{BII} – электрические емкости пьезоэлемента, кабельной перемычки и входная электрическая емкость вторичного преобразователя соответственно; $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{IT3}} + \frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_{BII}}$ – обратное сопротивление пьезодатчика; $R_{IT3} = \tilde{\rho}\frac{h_{IT3}}{S_{IT3}}$, R_K , R_{BII} – электрическое сопротивления и входное электрическое сопротивление, $\frac{1}{R_{IT3}} - \frac{1}{R_{IT3}} + \frac{1}{R_{IT3}}$ – обратное сопротивление пьезодатчика; $R_{IT3} = \tilde{\rho}\frac{h_{IT3}}{S_{IT3}}$, R_K , R_{BII} – электрическое сопротивление и расстояние между электроическая проницаемость, удельное объемное сопротивление и расстояние между электродами пьезоэлемента; $\omega = 2\pi f$, где f – частота измеряемого давления.

Если во всем диапазоне частот измеряемого давления выполняется соотношение

$$R^2 C^2 \omega^2 \gg 1, \tag{2}$$

то зависимость выходного напряжения пьезодатчика U от измеряемого акустического давления ΔP имеет вид

$$U = \frac{d_{33}}{C} S_{_{9\varphi\varphi}} \Delta P \,. \tag{3}$$

На основании выражения (6) с учетом (1) и (2) можно записать коэффициент преобразования пьезодатчика

$$K_{\Delta P} = \frac{U}{\Delta F} = \frac{S_{\Pi \Im} d_{\Im \Im}}{S_0 (C_{\Pi \Im} + C_{\rm K} + C_{\rm B\Pi})}.$$
 (4)

Поскольку при изменении состава ТНВ емкость пьезоэлемента практически не изменяется, изменение коэффициента преобразования $K_{\Delta F}$ будет определяться только изменением пьезомодуля d_{33} . Следовательно, при увеличении пьезомодуля d_{33} с 4,58 пКл/Н без применения легирующих добавок до 9,82 пКл/Н после легирования коэффициент преобразования увеличится не менее чем в два раза при сохранении неизменной электрической емкости пьезоэлемента, при этом удельное электрическое сопротивление пьезоэлемента увеличится в 98 раз, что в итоге приведет к повышению надежности функционирования датчика за счет снижения обратного тока через пьезоэлемент при высоких температурах.

Библиографический список

- 1. *Богуш, М. В.* Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Пьезоэлектрическое приборостроение / М. В. Богуш. – Ростов-на-Дону : СКНЦ ВШ, 2006. – Т. 3. – 346 с.
- 2. Датчики. Преобразователи. Системы. Каталог АО «НИИФИ». Пенза : Пензенская правда, 2011. С. 70–98.
- 3. *Мельников, А. А.* Система контроля состояния пьезоэлектрических датчиков давления / А. А. Мельников, Б. В. Цыпин, К. И. Бастрыгин, В. В. Кикот // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 4 (10). С. 29–34
- 4. Бастрыгин, К. И. К вопросу о коррекции температурной погрешности в пьезоэлектрических датчиках давления / К. И. Бастрыгин, В. В. Кикот // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 2 (8). – С. 25–30.
- 5. Баринов, И. Н. Компенсация дополнительной погрешности полупроводниковых датчиков давления, эксплуатирующихся при повышенной температуре / И. Н. Баринов, В. С. Волков, В. В. Кикот, С. К. Сигалаев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2015. – № 10. – С. 34–39.
- Кикот, В. В. Коррекция температурной погрешности пьезоэлектрического датчика динамического давления в условиях термоудара / В. В. Кикот, В. П. Маланин, М. А. Щербаков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (39). – С. 105–113.
- 7. *Чебурахин, И. Н.* Коррекция температурной погрешности, аппроксимация градуировочных характеристик чувствительных элементов датчикопреобразующей аппаратуры с внутридатчиковой электроникой / И. Н. Чебурахин, Д. И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2015. № 4 (14). С. 32–41.
- 8. *Кучумов, Е. В.* Струнный автогенераторный измерительный преобразователь на основе пьезоструктуры / Е. В. Кучумов, И. Н. Баринов, В. С. Волков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 2 (8). С. 58–65.
- 9. Применение пьезоструктур для создания струнного измерительного преобразователя на основе автоколебательной системы / Е. В. Кучумов, И. Н. Баринов, В. С. Волков, С. А. Гурин, С. П. Евдокимов // Измерительная техника. 2015. № 6. С. 49–52.
- 10. *Кривцов, В. А.* Высокотемпературные акустические датчики с органосиликатной изоляцией / В. А. Кривцов, Р. Ф. Масагутов. Ленинград : Наука, 1982. 167 с.
- Кошкин, Г. А. Исследование влияния германия на стабильность электрофизических свойств сегнетомягкой пьезокерамики / Г. А. Кошкин // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : сб. тр. Междунар. науч.техн. конф. «Шляндинские чтения–2018» (Пенза, 19–21 ноября). – Пенза, 2018. – С. 144–146.
- Pak, Ch. G. Investigation of the influence of shock activation on main properties of piezoelectric ceramics / Ch. G. Pak, A. V. Pryshchak, G. A. Koshkin // Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations : 14th International Symposium (Saint Petersburg, 14–18 may 2018). – Saint-Petersburg, 2018. – P. 162–163.
- Исследование возможностей повышения пьезоактивности высокотемпературных пьезоэлементов / А. И. Спицин, Д. А. Добрынин, А. М. Храмцов, А. Г. Сегалла, А. А. Буш // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Москва, 2015. – Ч. 3. – С. 27–31.

- 14. *Nanao, M.* Piezoelectric Properties of Bi 3 TiNbO 9 –BaBi 2 Nb 2 O 9 Ceramics / M. Nanao, M. Hirose, T. Tsukada // Japanese Journal of Applied Physics. – 2001. – T. 40, № 9S. – C. 5727.
- 15. *Heywang, W.* Tailoring of Piezoelectric Ceramics / W. Heywang, H. Thomann // Annual Review of Materials Science. 1984. T. 14, № 1. C. 27–47.

References

- Bogush M. V. P'ezoelektricheskie datchiki dlya ekstremal'nykh usloviy ekspluatatsii. P'ezoelektricheskoe priborostroenie [Piezoelectric sensors for extreme operating conditions. Piezoelectric instrument making]. Rostov-on-Don: SKNTs VSh, 2006, vol. 3, 346 p. [In Russian]
- 2. Datchiki. Preobrazovateli. Sistemy. Katalog AO «NIIFI» [Sensors. Converters. Systems. Catalogue of JSC "NIIFI"]. Penza: Penzenskaya pravda, 2011, pp. 70–98. [In Russian]
- Mel'nikov A. A., Tsypin B. V., Bastrygin K. I., Kikot V. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 4 (10), pp. 29–34 [In Russian]
- 4. Bastrygin K. I., Kikot V. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 2 (8), pp. 25–30. [In Russian]
- Barinov I. N., Volkov V. S., Kikot V. V., Sigalaev S. K. Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika [Devices and systems. Management, control, diagnostics]. 2015, no. 10, pp. 34–39. [In Russian]
- Kikot V. V., Malanin V. P., Shcherbakov M. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy*. *Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2016, no. 3 (39), pp. 105–113. [In Russian]
- Cheburakhin I. N., Nefed'ev D. I. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2015, no. 4 (14), pp. 32–41. [In Russian]
- 8. Kuchumov E. V., Barinov I. N., Volkov V. S. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 2 (8), pp. 58–65. [In Russian]
- 9. Kuchumov E. V., Barinov I. N., Volkov V. S., Gurin S. A., Evdokimov S. P. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 2015, no. 6, pp. 49–52. [In Russian]
- 10. Krivtsov V. A., Masagutov R. F. *Vysokotemperaturnye akusticheskie datchiki s organosilikatnoy izolyatsiey* [High temperature acoustic sensors with organosilicate insulation]. Leningrad: Nauka, 1982, 167 p. [In Russian]
- Koshkin G. A. Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Shlyandinskie chteniya–2018» (Penza, 19–21 noyabrya) [Methods, means and technologies of obtaining and processing of measuring information : proceedings of international. science.-tech. conf. " Shlyandinskie chteniya–2018" (Penza, November 19-21)]. Penza, 2018, pp. 144–146. [In Russian]
- Pak Ch. G., Pryshchak A. V., Koshkin G. A. Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations: 14th International Symposium (Saint Petersburg, 14–18 may 2018). Saint-Petersburg, 2018, pp. 162–163.
- 13. Spitsin A. I., Dobrynin D. A., Khramtsov A. M., Segalla A. G., Bush A. A. Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Fundamental problems of electronic instrument engineering : proceedings of the international. science.-tech. conf.]. Moscow, 2015, part 3, pp. 27–31. [In Russian]
- 14. Nanao M., Hirose M., Tsukada T. Japanese Journal of Applied Physics. 2001, vol. 40, no. 9S, p. 5727.
- 15. Heywang W., Thomann H. Annual Review of Materials Science. 1984, vol. 14, no. 1, pp. 27–47.

Кикот Виктор Викторович

кандидат технических наук, начальник центра пьезопроизводства, Научно-исследовательский институт физических измерений (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10) E-mail: distorsion@rambler.ru

Kikot Viktor Viktorovich

candidate of technical sciences, head of piezo production center, Scientific-research Institute of physical measurements (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

$2019, N^{0} 2 (28)$

Чебурахин Игорь Николаевич

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

Кошкин Глеб Александрович

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

Волков Вадим Сергеевич

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

Андреев Валерий Георгиевич

доктор технических наук, профессор E-mail: distorsion@rambler.ru

Cheburachin Igor Nikolaevich

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

Koshkin Gleb Aleksandrovich

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

Volkov Vadim Sergeevich

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

Andreev Valery Georgievich doctor of technical sciences, professor

Образец цитирования:

Высокотемпературный пьезоэлектрический датчик давления с повышенной чувствительностью на основе бессвинцовой пьезокерамики / В. В. Кикот, И. Н. Чебурахин, Г. А. Кошкин, В. С. Волков, В. Г. Андреев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 56–63. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-7.

УДК 681.518.52

DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-8

К. В. Гудков, К. Ю. Пискаев, М. В. Тюрин, Д. А. Ярославцева

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ

K. V. Gudkov, K. Yu. Piskaev, M. V. Tyurin, D. A. Yaroslavtseva

SIMULATION MODELING FOR COMPONENTS OF DATA-MEASURING SYSTEMS FOR FLUID FLOW CONTROL

Аннотация. Актуальность и цели. Показана целесообразность применения имитационного моделирования на стадии проектирования информационно-измерительной системы контроля расхода жидкостей. Цель работы: наглядно представить примененные методы модельно-ориентированного проектирования, включающие в себя имитационное моделирование механической, электронной и вычислительной частей информационноизмерительной системы контроля расхода жидкостей. Материалы и методы. В качестве среды имитационного моделирования выбрано программное обеспечение Matlab/ Simulink. *Результаты*. В работе представлены имитационные модели прямотрубного кориолисового расходомера, построенные в среде имитационного моделирования Matlab/Simulink. Выполнено моделирование работы расходомера при различных условиях протекания жидкой среды, а также проведена имитация внешних вибрационных воздействий как на сам расходомер, так и на элементы трубопровода. На основании полученных экспериментальных данных подобраны характеристики системы обработки данных. Рассмотрена проблематика влияния внешних воздействий и способов их устранения. Показаны процессы динамического изменения физических свойств тел, связанных с их молекулярной структурой, а также рассмотрены технические и технологические процессы, способные внести изменения в точностные параметры измерительного прибора вследствие разброса параметров элементов конструкции. Выводы. Исследования имитационных моделей позволили определить технические ограничения, которые могут значительно снизить точность работы информационно-измерительной системы контроля расхода жидкостей на месте ее эксплуатации.

A b s t r a c t. *Background*. Applicability of simulation modeling when designing a datameasuring system for fluid flow control has been illustrated. The work objective is to visualize the applied techniques of the model-based design including simulation modeling of mechanical, electronic and computing components of the data system for fluid flow control. *Materials and methods*. Matlab/Simulink software functions as simulation modeling environment. *Results*. Simulation models of straight-tube Coriolis acceleration flowmeter constructed in Matlab/Simulink simulation modeling environment have been presented. Simulation of flowmeter operation under various flow medium conditions has been performed, as well as simulation of external vibration input both on the flowmeter and pipeline components. Relying on experimental findings, parameters of the data processing system have been selected. External inputs and remedies for them have been discussed. Dynamic changes in physical properties of bodies in terms of their molecular architecture have been illustrated; technical and technological processes likely to change accuracy characteristics of a measuring instrument due to parameter spread of assembly components have been also described. *Conclusions*. Research and

© Гудков К. В., Пискаев К. Ю., Тюрин М. В., Ярославцева Д. А., 2019

analysis of simulation models have helped to define technical constraints threatening to impair operating accuracy of the data-measuring system for fluid flow control on-site.

К лючевые слова: информационно-измерительная система контроля расхода жидкостей, модуль сбора данных, имитационное моделирование, кориолисов расходомер, элементы модельно-ориентированного проектирования.

K e y w o r d s: data-measuring system for fluid flow control, data acquisition module, simulation modeling, Coriolis flowmeter, model-based design techniques.

Введение

В современных технически сложных системах особую роль играет процесс отладки и верификации. Для этого применяют дорогостоящие макетные образцы. Помимо этого значительно увеличивается время проектирования, а имеющиеся недостатки и ошибки выявляются только на конечных этапах. Для решения этой проблемы целесообразно применять имитационное моделирование еще на стадии проектирования отдельных узлов систем. Далее разработанные модели отдельных частей системы объединяют между собой для отладки их взаимодействия. Подобное применение имитационного моделирования известно как модельноориентированное проектирование.

Отдельный класс технически сложных систем представляют собой информационноизмерительные системы физических величин прецизионной точности, в частности, системы контроля расхода жидкостей или газов на базе кориолисовых расходомеров. Разработка подобной системы методами модельно-ориентированного проектирования включает в себя имитационное моделирование механической и электронно-вычислительной частей расходомера [1–3].

Эти расходомеры имеют одну или несколько расходных трубок прямой или изогнутой конфигурации. Каждая конфигурация расходной трубки в массовом расходомере Кориолиса имеет набор собственных вибрационных мод [4, 5], который может относиться к типу простого изгиба, кручения или к смешанному (связанному) типу. Каждая расходная трубка приводится в колебательное движение в резонансе на одной из этих собственных мод. Жидкость втекает в расходомер из смежного трубопровода на стороне впуска, направляется в расходную трубку (или трубки) и вытекает из расходомера в трубопровод, подключенный на выпускной стороне расходомера. Собственные вибрационные моды вибрирующей (колеблющейся), наполненной жидкостью системы, определяются частично комбинированной массой расходных трубок и материалом внутри расходных трубок.

Когда нет потока через расходомер, все точки вдоль расходной трубки колеблются в одинаковой фазе в результате приложения силы возбуждения. Как только начнет протекать поток материала, ускорения Кориолиса приводят к появлению различных фаз для каждой точки вдоль расходной трубки [6, 7]. Фаза на стороне впуска расходной трубки имеет запаздывание относительно фазы возбуждения, в то время как фаза на стороне выпуска имеет опережение относительно фазы возбуждения. На корпусе расходной трубки размещены датчики для выработки синусоидальных сигналов, несущих информацию относительно движения расходной трубки. Разность фаз между двумя сигналами датчиков пропорциональна массовому расходу материала, протекающего через расходную трубку.

Измерения в массовом расходомере Кориолиса должны быть произведены с высокой степенью точности, так как часто ставится требование, чтобы полученная информация о массовом расходе имела точность по меньшей мере 0,15 % отсчета [8]. Блок обработки сигналов, на который поступают выходные сигналы датчиков, с высокой точностью измеряет разность фаз и вырабатывает желательные характеристики протекающего обрабатываемого материала с требуемой точностью, которая составляет по меньшей мере 0,15 % отсчета.

Для достижения указанной точности необходимо, чтобы блок обработки сигнала с высокой точностью производил измерение фазового сдвига двух сигналов, которые поступают на него от расходомера [9, 10]. Так как фазовый сдвиг между двумя выходными сигналами измерительного прибора представляет собой информацию, которая используется в блоке обработки для получения характеристик материала, необходимо, чтобы блок обработки не вводил никакого фазового сдвига, который мог бы маскировать информационный фазовый сдвиг, создаваемый выходными сигналами датчика. На практике требуется, чтобы этот блок обработки имел чрезвычайно малый собственный присущий ему фазовый сдвиг, так чтобы фаза каждого выходного сигнала сдвигалась менее чем на 0,001 % [11], а в некоторых случаях даже менее чем на несколько миллионных градуса. Указанная точность измерения фазы требуется, если нужно достичь точности выше 0,15 % для производной информации, касающейся обрабатываемого материала.

Материалы и методы

В качестве среды имитационного моделирования выберем MATLAB/Simulink. Он позволяет моделировать как механические компоненты системы, так и систему сбора и обработки информации.

Рассмотрим Simulink-модель механической части системы (рис. 1). Она позволяет исследовать измерение параметров потока жидкости при различных динамически изменяющихся условиях. При этом скорость потока жидкости прямо пропорциональна временной задержке между левыми и правыми половинами расходомерной трубки. Задержка возникает вследствие силы Кориолиса, которая возникает во время колебаний расходомерной трубки с текущей в ней жидкостью. Направление силы Кориолиса в левой и правой половине трубки направлено в противоположные стороны [3, 12]. Коэффициент пропорциональности для каждого расходомера зависит от механических свойств трубки, воздействия колебательного механизма и передаточных функций измерительных преобразователей [3].



Рис. 1. Модель трубки кориолисова расходомера

Опишем подробнее составные части модели: Sharnir Left и Sharnir Right – это левый и правый шарниры соответственно. Они делают расходомерную трубку подвижной относительно жестких заделок Ground, так что перемещения краев трубки возможны только в оси Ox.

Рассмотрим подробнее подсистему Body, в состав которой входят расходомерная трубка и датчики давления (рис. 2).



Рис. 2. Модель расходомерной трубы и датчиков

Для описания колебания трубки принимаем ограничение, не позволяющее совершать колебания, кроме вертикальной плоскости. В реальных расходомерах этого добиваются правильной установкой и калибровкой. Наличие боковых колебаний снижает точность измерения параметров потока. Другим ограничением выступает дискретность расходомерной трубки. Это связано с невозможностью точного описания колебательных процессов средствами Simulink. Физические тела представляются абсолютно твердыми элементами с возможностью упругого соединения между ними. Для обхода данного ограничения трубки представляют конечным набором малых элементов, увеличение числа которых позволяет приблизить ее механические свойства к реальным прототипам. Для этого параметры упругого соединения подбираются эмпирическим путем. На рис. 2 продемонстрированы две подсистемы, включающие в себя наборы блоков с имитацией трубки и протекающей жидкости. К параметрам трубки относят жесткость, демпфирующие свойства, вес трубки, ее прогиб под собственным весом и наличие отложений, влияющих на диаметр внутреннего сечения и механические характеристики объекта моделирования. К параметрам жидкости относятся плотность, скорость, температура. Изменение параметров жидкости вызывает изменение параметров силы Кориолиса, рассчитываемой в этих же подсистемах для каждого отрезка трубки. На расчет силы Кориолиса также влияют параметры, задаваемые блоком имитации принудительных колебаний (рис. 3).



Рис. 3. Simulink – модель блока имитации принудительных колебаний

В блоке имитации принудительных колебаний задаются начальные параметры колебания расходомерной трубки. В ходе моделирования они могут изменяться, так как частота колебаний соответствует резонансной частоте заполненной жидкостью трубки. В зависимости от частоты колебаний рассчитывается плотность жидкости. В блоке записываются, сохраняются в памяти мгновенные значения скорости потока жидкости, чтобы использовать его для расчета силы Кориолиса и вычисляются значения временной задержки между входным и выходным сигналом. Они используются в качестве эталонных значений при проверке данных, получаемых с имитационных моделей датчиков давления, при моделировании которых учитывались метрологические и физические параметры, а именно: габариты, масса, упругость чувствительного элемента, максимальный прогиб и др. В модели для реализации быстродействия и чувствительности датчика были подобраны значения жесткости и демпфирующих свойств системы измерения силы.

Результаты

Выполним моделирование расходомера, используя средства Matlab/Simulink, основываясь на приближенном отображении гибкого тела последовательностью твердых тел, соединенных между собой пружинящими и амортизирующими элементами. Жесткость пружин и коэффициенты демпфирования амортизаторов описываются функциями материальных свойств и геометрией гибких элементов. Процедуру моделирования целесообразно разбить на пять этапов:

1) трубка делится на дискретные элементы, и определяются степени свободы каждого элемента;

2) степени свободы задаются посредством соединений в середине каждого элемента вдоль нейтральной оси;

3) согласно теории гибкого тела определяются эффективные константы геометрии пружины, материальные свойства и граничные условия;

4) задаются демпфирующие свойства каждого соединения;

5) полученные элементарные отрезки соединяются между собою.

В данной модели имитируем тонкостенную трубку, изготовленную из алюминия, диаметром 60 мм, рабочая частота колебаний расходомера составит 350 Гц, амплитуда 10 мкм, что является типовой частотой для расходомеров подобных типоразмеров. Протекание жидкости имитируется изменением массы элементов трубки и воздействиями на блоки расчета влияния силы Кориолиса, остальные процессы, происходящие в трубопроводе при прохождении по нему жидкости, не моделируются. В модели задаются параметры движения трубки, начальная скорость потока, вычисляются сила Кориолиса и ее влияние на форму колебания расходомерной трубки. Помимо этого, в модели задаются значения плотности и объема воды, плотности и размера трубки, коэффициент демпфирования и жесткости шарниров.

Между соединяющимися элементами задаются угол поворота, относительная угловая скорость, коэффициент жесткости, коэффициент демпфирования, силовое воздействие между элементами.

Коэффициенты жесткости и демпфирования задаются в соответствии с расчетными значениями величины прогиба трубки под действием тестовых сил.

Модель позволяет измерить вектор проекций абсолютной угловой скорости точки тела, к порту которой он присоединен.

Выполним моделирование протекания жидкой среды с различными скоростями потока для установления линейности показаний модели. Тестирование проводилось со скоростями 1, 5, 10 м/с. Для анализа быстроизменяющегося потока смоделируем поток жидкости с синусоидальным изменением скорости (амплитуда – 10 мм, частота – 350 Гц). Также исследовано поведение системы при наличии ступенчатого изменения скорости жидкости. Результаты эксперимента представлены на рис. 4.



Рис. 4. Графики зависимости задержки между двумя сигналами, полученными с датчиков давления, от начальной скорости потока: *a* – постоянная скорость; *б* – ступенчатое изменение скорости потока

Из графиков видно, что шумовая составляющая возрастает с увеличением скорости потока, это может быть связано только с неточностью вычисления временной задержки между частями трубы. При этом значения лежат в рамках одного диапазона и могут быть успешно усреднены. Из анализа синусоидального входного сигнала видно, что система успевает среагировать на периодичное изменение скорости жидкости. Амплитуда выходного сигнала по-

Measuring. Monitoring. Management. Control

стоянна и не имеет значительных отклонений или грубо искаженных результатов. При ступенчатом изменении скорости потока в системе наблюдаются остаточные колебания скорости на незначительном временном интервале, но при этом возникают колебания выходного сигнала при постоянной скорости потока.

Для улучшения наглядности результатов моделирования выполним фильтрацию полученных результатов моделирования (рис. 5).



Рис. 5. Усреднение значений задержки между двумя сигналами, полученными с датчиков давления, от начальной скорости потока: *a* – постоянная скорость; *б* – ступенчатое изменение скорости потока

Благодаря процессу усреднения значений произошло избавление от грубо искаженных результатов измерений. Графики стали более гладкими. Еще можно заметить, что чем выше скорость потока в трубке, тем больше значение задержки. Разность интервалов времени между сигналами измеряется в микросекундах.

Измеряемый поток почти никогда не бывает идеальным, чаще всего на него воздействуют внешние факторы, например низкая скорость, несформированность и пульсации потока, шероховатость трубопровода, многофазность среды (наличие воздуха в воде, наличие воды в паре), содержание механических примесей. На рис. 6 изображены графики, где проходящая по трубопроводу жидкость не является идеальной. Данные графики отражают задержку между двумя сигналами, полученными с датчиков давления, находящихся на разных концах трубки. Тестирование проводилось со скоростями 1, 5, 10 м/с и с шумом, амплитуда которого 8 мм и частота 350 Гц.



Рис. 6. Графики задержки между двумя сигналами, полученными с датчиков давления

Из-за искаженного потока жидкости, проходящего по расходомеру, результат измерения получается некорректным. Чтобы предотвратить это, необходима дополнительная фильтрация (рис. 7) [13–16]. Применим полосовой фильтр, обеспечивающий подавление сигналов за пределами информативной полосы, ограниченной частотой работы расходомера.



Рис. 7. Фильтрация значений задержки между двумя сигналами, полученными с датчиков давления

Незначительные колебания присутствуют в сигнале. Это обусловлено совпадением рабочей частоты расходомера и полосой частот промышленных шумов. В работах [17, 18] приведены способы устранения подобных искажений в информативном сигнале.

По полученным результатам моделирования можно рассчитать значение сигнал/шум (SNR). Отношение сигнал/шум – безразмерная величина, равная отношению мощности полезного сигнала к мощности шума. В табл. 1 приведена зависимость отношения SNR от начальной скорости потока в зашумленных и отфильтрованных значениях задержки.

Таблица 1

Значение начальной скорости потока, м/с	Отношение SNR в зашумленных значениях задержки	Отношение SNR в отфильтрованных значениях задержки		
1	48,9955	39,8855		
5	76,9414	39,1864		
10	89,6763	39,1864		

Зависимость отношения *SNR* от начальной скорости потока в зашумленных и отфильтрованных значениях задержки

Отношение сигнал/шум в зашумленных значениях задержки увеличивается с повышением начальной скорости потока, а отношение сигнал/шум в отфильтрованных значениях задержки примерно одинаковое.

Обсуждение

Использование модельно-ориентированного подхода позволяет решить большинство проектных задач еще на этапе моделирования. Но существует и ряд ограничений, а именно, что при создании массового расходомера возникает необходимость его калибровки для выявления предельной точности измерений. Имитационная модель всегда будет показывать абсолютную (максимальную для данных условий моделирования) точность. Для устранения такого эффекта необходимо вводить в модель имитацию помех и ограничивать искусственно точность измерений. Рассмотрим подробнее возможные ограничения, которые негативно повлияют на точность измерения расхода.

Другим ограничением выступает калибровка датчика. Процесс калибровки включает в себя проверку показаний датчика с помощью рабочих средств измерения. Они имеют погреш-

ность измерений $\delta_0 = \pm (0,1...0,2)$ %. Если разрабатываемый датчик имеет более высокую погрешность измерений, то необходимо использовать более точные рабочие эталоны. Эталоны второго разряда обладают минимальной погрешностью $\delta_0 = \pm 0,15$ %, а эталон первого разряда $\delta_0 = \pm 0,05$ %. Следующими средствами калибровки являются рабочие эталоны, заимствованные из других поверочных систем. Они обеспечивают точность измерений с погрешностью $\delta_0 = \pm 0,02$ %. Наиболее точным средством калибровки выступает первичный эталон с погрешностью $\delta_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ % [19].

Достижению предельной точности измерений препятствует наличие погрешностей, от которых невозможно полностью избавиться или скомпенсировать. При работе кориолисова расходомера измерительная трубка непрерывно вибрирует на своей резонансной частоте ω_p . Поскольку значение ω_p зависит от соотношения $\sqrt{k/m}$, то при неизменных геометрических размерах трубки можно определить зависимость ω_p от плотности ρ . Практически для этих целей используют только воду и воздух. Плотность воды не является постоянной величиной. Плотность воды колеблется в пределах $\pm 0,0000135$ г/см³. Эта величина может существенно влиять на показания датчика, вызывая погрешность в 0,00135 % [19].

Также существуют технические проблемы при формировании потока с необходимыми точностными характеристиками по массовому расходу и плотности. Следовательно, невыполнение условия k = const требует применения в процессе калибровки как минимум еще одного вещества.

Колебания датчика Кориолиса в первом приближении рассматриваются как гармонические. Увеличение амплитуды колебаний позволяет более точно определить величину силы Кориолиса. Если жесткость системы уменьшается с увеличением амплитуды, то колеблющаяся трубка имеет «мягкую» характеристику, если же она растет, то колеблющаяся трубка обладает «жесткой» характеристикой нелинейной восстанавливающей силы. Наличие нелинейности ведет к тому, что в дифференциальном уравнении движения появляются члены, в описании которых амплитуда колебаний содержит степени, больше единицы. В таком случае замена sin(α) = α , как в простом гармоническом колебании, неприемлема. Необходимо раскладывать функцию sin φ в степенной ряд $d^2 \varphi/dt^2 + \omega_0^2 \varphi = -e_1 \omega^3 - e_2 \varphi^5$, при учете нелинейных членов пятого порядка погрешность измерений не превышает тысячной доли процента [20].

Широкий температурный диапазон внешней среды и измеряемого вещества наряду с различным влиянием каждого элемента конструкции на температурную погрешность существенно усложняет корректирующую процедуру. Необходимо учитывать не только абсолютную температуру каждого элемента, но и его вес, а также ее градиент между всеми элементами. В результате измеренные значения корректируют с учетом температурного изменения модуля упругости, механического напряжения измерительной трубки и плотности протекающего материала.

Также необходимо учитывать влияние температуры тела на испытываемую им силу тяжести. Так как приращение Δg ускорения силы тяжести в первом приближении пропорционально ускорению действующих на тело внешних упругих сил, величина и знак Δg зависят от направления вектора ускорения. При влиянии упругих сил на силу тяжести появляется зависимость силы тяготения, приложенной к пробному телу, от температуры тела. При изменении температуры тела на 11 К/мин мы получаем изменение массы на 3,43 мг/мин [21].

Также следует отметить ряд причин, влияние которых на технические характеристики расходомера либо учитывают только через средние значения, либо не учитывают. Поскольку расходомер устанавливается на различных участках трубопроводов, при каждом монтаже всегда будет различное абсолютное среднее значение механического напряжения измерительной трубки. Кроме того, моменты усилия, с которым крепятся фланцы расходомера, различаются как по значению, так и по распределению этого момента по окружности фланца. Следовательно, подвеска обеих сторон расходомера практически всегда несимметрична.

Учитывая, что крепление также не идеально жесткое, т.е. не полностью гасит переменные силы и моменты (в местах крепления не образуются чистые узлы колебаний), происходит ассиметричный обмен энергией с трубопроводом. Кроме того, все изменения состояния внешнего трубопровода (начиная от температурных и кончая вибрациями) ассиметричным образом влияют на точность изменений.

Как уже упоминалось, резонансная частота (возбуждения) имеет значение порядка 300 Гц, т.е. близка к промышленной частоте. Следовательно, весь спектр внешних шумов, лежащий в полосе резонанса, усиливается с тем же коэффициентом, что и полезный сигнал.

Заключение

Разработанные в рамках проведенного исследования модели показали, что внешние воздействия оказывают значительный негативный вклад в точность определения параметров потока жидкости. Данный недостаток практически невозможно устранить имеющимися методами цифровой обработки сигналов, так как частота работы расходомера совпадает с зоной промышленных шумов. Большинство разработок направлены на повышение частоты работы расходомера, для преодоления верхнего порога зоны промышленных шумов в 500 Гц [22]. Но на данном этапе развития техники и технологий данную частоту работы расходомера развития всех типов, размеров и конструкций кориолисовых расходомеров [23, 24].

Библиографический список

- Schweiger, R. Methods for calibration of a mass flowmeter for supercritical helium, Advances / R. Schweiger, A. Singer, I. Kühn, K. Johst // Cryogenic Engineering. 1991. № 37. P. 147–154.
- Yang, W. Q. Role of tomography in gas/solids flow measurement / W. Q. Yang, S. Liu // Flow Measurement & Instrumentation. – 2000. – № 11 (3). – P. 237–244.
- 3. Xu, K. A signal processing method for Coriolis mass flowmeter based on time-varying signal model and lattice notch filter / K. Xu, W. Ni, Z. Chen // Chinese Journal of Scientific Instrument. 2006. № 27 (2). P. 596–601.
- Ni, W. A signal processing method for Coriolis flowmeter based on time-varying signal model and normalized lattice notch filter / W. Ni, K. Xu // Acta Metrologica Sinica. – 2007. – № 28 (3). – P. 243–247.
- 5. *Tu, Y.* Frequency tracking method and simulation for Coriolis Mass Flowmeter based on new adaptive notch filter / Y. Tu, F. Su, T. Shen, H. Zhang // Journal of Chongqing University. 2011. № 34 (10). P. 147–152.
- 6. Svete, A. Theoretical and experimental investigations of flow pulsation effects in Coriolis mass flowmeters / A. Svete, J. Kutin, G. Bobovnik, I. Bajsić // Journal of Sound and Vibration. 2015. № 352. P. 30–45.
- Development of Coriolis mass flowmeter with digital drive and signal processing technology / Q. Hou, K. Xu, M. Fang, C. Liu, W. Xiong // ISA Transactions. 2013. № 52 (5). P. 692–700.
- Yang, H. Phase difference measuring method based on SVD and Hilbert transform for Coriolis mass flowmeter. Chinese / H. Yang, Y. Tu, H. Zhang, P. Yi // Journal of Scientific Instrument. 2012. № 33 (9). P. 2101–2107.
- Signal processing for Coriolis mass flowmeter based on Hilbert transform / W. Liu, L. Zhao, K. Wang, Z. Feng, Q. Long // Acta Metrologica Sinica. – 2013. – № 34 (5). – P. 446–451.
- 10. So, H. C. A comparative study of two discrete-time phase delay estimators / H. C. So // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2005. № 54 (6). P. 2501–2504.
- Shanmugavalli, M. Smart Coriolis mass flowmeter / M. Shanmugavalli, M. Umapathy, G. Uma // Measurement. – 2010. – № 43 (4). – P. 549–555.
- Yang, H. A frequency tracking method based on improved adaptive notch filter for coriolis mass flowmeter / H. Yang, Y. Tu, H. Zhang // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – № 128–129. – P. 450–456.
- Xu, K.-J. A lattice notch filter based signal processing method for coriolis mass flowmeter / K.-J. Xu, W. Ni // Acta Metrologica Sinica. – 2005. – № 26 (1). – P. 49–52.
- 14. *Vucijak, N. M.* A simple algorithm for the estimation of phase difference between two sinusoidal voltages / N. M. Vucijak, L. V. Saranovac // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2010. № 59 (12). P. 3152–3158.
- Hall, R. Measuring mass flow and density with Coriolis meters / R. Hall // InTech. 1990. № 37 (4). – P. 45–46.
- Sharma, S. C. Performance evaluation of an indigenously designed copper (U) tube Coriolis mass flow sensors / S. C. Sharma, P. P. Patil, M. A. Vasudev, S. C. Jain // Measurement. – 2010. – № 43 (9). – P. 1165–1172.
- Imitation modelling for the subsystem of identification and structuring data of signal sensors / M. Yu. Mikheev, T. V. Zhashkova, E. N. Meshcheryakova, K. V. Gudkov, A. K. Grishko // Proceedings of 2016 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS. 2016. 7807748.
- Гудков, К. В. Способ автоматической поверки кориолисовых расходомеров на месте их эксплуатации / К. В. Гудков, М. Ю. Михеев, В. А. Юрманов, Н. К. Юрков // Измерительная техника. – 2012. – № 2. – С. 29–32.
- 19. Александров, В. С. Макроскопические флуктуации плотности воды / В. С. Александров, Л. А. Баденко, В. С. Снегов // Измерительная техника. – 2004. – № 3. – С. 54–56.
- Хомяков, Г. Д. Государственный первичный эталон единицы массового расхода жидкости / Г. Д. Хомяков, А. Г. Сафин, Н. В. Комиссаров // Измерительная техника. – 2003. – № 10. – С. 3–6.
- 21. Дмитриев, А. Л. Влияние температуры тела на его вес / А. Л. Дмитриев, Е. М. Никущенко, В. С. Снегов // Измерительная техника. – 2003. – № 2. – С. 8–11.
- 22. Pereira, M. Flow meters: Part 1 / M. Pereira // IEEE Instrumentation and Measurement Magazine. 2009. № 12 (1). P. 18–26.
- 23. *Михеев, М. Ю.* Системы поверки кориолисовых расходомеров / М. Ю. Михеев, К. В. Гудков, В. А. Юрманов, Н. К. Юрков // Измерительная техника. 2012. № 8. С. 51–54.
- 24. Патент 2380660 РФ, МПК G01F 25/00, G01F 1/84. Способ повышения точности проверки расходомера / Михеев М. Ю., Юрманов В. А, Гудков К. В., Куц А. В., Володин К. И. ; заявитель и патентообладатель Пенз. гос. техн. акад. – № 2007129984/28 ; заявл. 06.08.2007 ; опубл. 27.01.2010, Бюл. № 3. – 18 с.

References

- Schweiger R., Singer A., Kühn I., Johst K. Cryogenic Engineering. 1991, no. 37, pp. 147– 154.
- 2. Yang W. Q., Liu S. Flow Measurement & Instrumentation. 2000, no. 11 (3), pp. 237-244.
- Xu K., Ni W., Chen Z. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2006, no. 27 (2), pp. 596– 601.
- 4. Ni W., Xu K. Acta Metrologica Sinica. 2007, no. 28 (3), pp. 243–247.
- 5. Tu Y., Su F., Shen T., Zhang H. Journal of Chongqing University. 2011, no. 34 (10), pp. 147–152.
- Svete A., Kutin J., Bobovnik G., Bajsić I. *Journal of Sound and Vibration*. 2015, no. 352, pp. 30–45.
- Hou Q., Xu K., Fang M., Liu C., Xiong W. ISA Transactions. 2013, no. 52 (5), pp. 692– 700.
- 8. Yang H., Tu Y., Zhang H., Yi P. Journal of Scientific Instrument. 2012, no. 33 (9), pp. 2101–2107.
- Liu W., Zhao L., Wang K., Feng Z., Long Q. Acta Metrologica Sinica. 2013, no. 34 (5), pp. 446–451.
- 10. So H. C. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.* 2005, no. 54 (6), pp. 2501–2504.
- 11. Shanmugavalli M., Umapathy M., Uma G. Measurement. 2010, no. 43 (4), pp. 549–555.
- Yang H., Tu Y., Zhang H. Applied Mechanics and Materials. 2012, no. 128–129, pp. 450– 456.
- 13. Xu K.-J., Ni W. Acta Metrologica Sinica. 2005, no. 26 (1), pp. 49-52.
- Vucijak N. M., Saranovac L. V. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2010, no. 59 (12), pp. 3152–3158.
- 15. Hall R. InTech. 1990, no. 37 (4), pp. 45-46.
- Sharma S. C., Patil P. P., Vasudev M. A., Jain S. C. *Measurement*. 2010, no. 43 (9), pp. 1165–1172.
- 17. Mikheev M. Yu., Zhashkova T. V., Meshcheryakova E. N., Gudkov K. V., Grishko A. K. *Proceedings of 2016 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS.* 2016, 7807748.

- 18. Gudkov K. V., Mikheev M. Yu., Yurmanov V. A., Yurkov N. K. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 2012, no. 2, pp. 29–32. [In Russian]
- 19. Aleksandrov V. S., Badenko L. A., Snegov V. S. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 2004, no. 3, pp. 54–56. [In Russian]
- 20. Khomyakov G. D., Safin A. G., Komissarov N. V. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 2003, no. 10, pp. 3–6. [In Russian]
- 21. Dmitriev A. L., Nikushchenko E. M., Snegov V. S. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 2003, no. 2, pp. 8–11. [In Russian]
- 22. Pereira M. IEEE Instrumentation and Measurement Magazine. 2009, no. 12 (1), pp. 18–26.
- Mikheev M. Yu., Gudkov K. V., Yurmanov V. A., Yurkov N. K. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 2012, no. 8, pp. 51–54. [In Russian]
- 24. Patent 2380660 RF, MPK G01F 25/00, G01F 1/84. Sposob povysheniya tochnosti pro-verki raskhodomera [Patent 2380660 of the Russian Federation, IPC G01F 25/00, G01F 1/84. Method for improving the accuracy of flow meter verification]. Mikheev M. Yu., Yurmanov V. A, Gudkov K. V., Kuts A. V., Volodin K. I.; applicant and patent holder Penza State Technological Academy. № 2007129984/28; appl. 06.08.2007; publ. 27.01.2010, Bull. no. 3, 18 p. [In Russian]

Гудков Кирилл Владимирович

кандидат технических наук, доцент, кафедра информационных технологий и систем, Пензенский государственный технологический университет (Россия, г. Пенза, проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1a/11) E-mail: gudkovk.pgta@gmail.com

Пискаев Кирилл Юрьевич

кандидат технических наук, доцент, кафедра информационных технологий и систем, Пензенский государственный технологический университет (Россия, г. Пенза, проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1a/11) E-mail: PiskaevK@gmail.com

Тюрин Михаил Владимирович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт физических измерений (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10) Е-mail: info@niifi.ru *Ярославцева Дарья Александровна* аспирант, инженер-конструктор, Научно-исследовательский институт физических измерений (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10) Е-mail: levik_92@mail.ru

Gugkov Kirill Vladimirovich

candidate of technical sciences, associate professor, sub-department of information technology and systems, Penza State Technological University (1a/11 Baydukova passage /Gagarina street, Penza, Russia)

Piskaev Kirill Yur'evich

candidate of technical sciences, associate professor, sub-department of information technology and systems, Penza State Technological University (1a/11 Baydukova passage /Gagarina street, Penza, Russia)

Tyurin Mihail Vladimirovich

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

Yaroslavtseva Daria Aleksandrovna

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

Образец цитирования:

Гудков, К. В. Имитационное моделирование составных частей информационно-измерительной системы контроля расхода жидкостей / К. В. Гудков, К. Ю. Пискаев, М. В. Тюрин, Д. А. Ярославцева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 64–75. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-8.

УДК 621.317

DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-9

О. Е. Безбородова, О. Н. Бодин, В. Г. Полосин, А. Г. Убиенных

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОНТРОЛИРУЕМОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭНТРОПИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КВАНТА

O. E. Bezborodova, O. N. Bodin, V. G. Polosin, A. G. Ubiennykh

CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE CONTROLLED OBJECT BASED ON THE ANALYSIS OF THE ENTROPY OF THE DISTRIBUTION OF INFORMATION-MEASURING QUANTUM

Аннотация. *Актуальность и цели*. Целью работы является разработка алгоритма построения математической модели контролируемого объекта на основе анализа энтропии распределения информационно-измерительного кванта. Материалы и методы. В работе подробно рассмотрены свойства информационно-измерительного кванта и возможность его использования для оценки естественной изменчивости при решении измерительных задач и для алгоритмизации накопления измерительной информации. Информационно-измерительный квант рассматривается как минимальное формирование математической модели, отражающее суть вероятностных физических процессов, происходящих в контролируемом объекте. В работе рассмотрены возможности применения многомерного информационно-измерительного кванта для анализа энтропии информации, содержащейся в массиве результатов измерений, полученных от контролируемого объекта. Результаты. Предложен способ построения математической модели объекта, основанный на сопоставлении информационных энтропий модели и эксперимента. Показано значение информации, содержащейся в энтропии распределения кванта для оценки состояния контролируемого объекта. Разработан алгоритм выбора и оценки параметров модели на основе анализа энтропии распределения информационно-измерительного кванта. На примере распределения Вейбулла – Гнеденко и гамма распределения иллюстрируется выбор формы регрессии путем сопоставления коэффициенту энтропии двухмерного информационно-измерительного кванта результатов измерений и параметра формы статистической кривой, применяемой в качестве регрессии. Выводы. Результаты исследования двухмерного информационно-измерительного кванта были использованы для построения модели взаимосвязи неопределенностей временных характеристик распространения автоволнового сигнала проводящей системы сердца.

A b s t r a c t. *Background*. The aim of the work is to develop an algorithm for constructing a mathematical model of a controlled object based on an analysis of the entropy of the distribution of an information-measuring quantum. *Materials and methods*. In this paper, the properties of the information-measuring quantum and the possibility of its use for assessing natural variability in solving measurement problems and for algorithmic accumulation of measuring information are considered in detail. An information-measuring quantum is considered as the minimal formation of a mathematical model reflecting the essence of probabilistic physical processes occurring in a controlled object. The paper considers the possibility of using a multi-

© Безбородова Е. А., Бодин О. Н., Полосин В. Г., Убиенных А. Г., 2019

dimensional information measuring quantum for the analysis of the entropy of information contained in an array of measurement results obtained from a controlled object. **Results**. A method of constructing a mathematical model of the object based on a comparison of information entropies of the model and the experiment is proposed. The value of the information contained in the entropy of the quantum distribution to assess the state of the controlled object is shown. The algorithm of choice and estimation of model parameters on the basis of the analysis of entropy of distribution of information measuring quantum is developed. For example, the distribution of the Weibull-Gnedenko and gamma distributions is illustrated by the choice of the form of the regression by comparing the coefficient of two-dimensional entropy information and quantum measurement, re-measurement results and the shape parameter of the statistical curve that is used as regression. **Conclusions**. The results of the study of two-dimensional information measuring quantum were used to construct a model of the relation-ship between the uncertainties of the time characteristics of the propagation of the autowave signal of the cardiac conduction system.

К лючевые слова: форма математической модели, информационно-измерительный квант, неопределенность величины, статистические распределения, информационная энтропия, распределение Вейбулла – Гнеденко, гамма распределение.

K e y w o r d s: form of mathematical model, information-measuring quantum, uncertainty of quantity, statistical distributions, information entropy, Weibull – Gnedenko distribution, gamma distribution.

Математическое моделирование в экспериментальных исследованиях

Проблема выбора математической формы модели при интерпретации и анализе результатов эксперимента является важнейшей задачей анализа данных при построении физических и технических моделей. Традиционные пути решения подобной задачи основываются на аппроксимации данных с помощью нелинейных функций или полиноминальной регрессии [1–4].

Необходимость проведения большинства экспериментов связана с установлением математической модели наблюдаемых величин, которое включает в себя три основных этапа [3].

На первом этапе устанавливается форма математической модели. В связи с тем, что одни и те же данные эксперимента на исследуемом участке с одинаковой точностью могут быть описаны самыми различными аналитическими выражениями, необходим выбор кривой аппроксимации адекватный задачам поставленного эксперимента. Рациональный выбор аналитического описания обоснован лишь при учете ряда требований к математической модели: удобство использования; компактность модели и ее содержательность (т.е. интерпретируемость аналитического описания, достигаемая путем придания физического смысла константам и функциям построенной модели).

На втором этапе построения математической модели проводится расчет параметров выбранной аппроксимирующей функции по выборке экспериментальных данных. Этот этап хорошо формализуем, так как связан с решением уравнений, построенных для всех *n* экспериментально наблюдаемых точек, и применением различных алгоритмов нахождения параметров регрессий. Усреднение несовместных решений избыточной системы уравнений можно провести различными методами: графическим методом, методом медианных центров, метод наименьших квадратов и др.

На третьем этапе проводят проверку адекватности модели с помощью критерия проверки, построенного на совпадении математических ожиданий (критерий Стьюдента) или на совпадении средних квадратических отклонений (критерий Фишера) результатов измерений и кривой моделирования, соответственно.

Несмотря на хорошую алгоритмизацию второго и третьего этапов определения математической модели, первый этап выбора формы математической модели, остается не формализуемой задачей. Для этих целей традиционно используются графические методы установления формы зависимости: метод обведения контура границ полосы рассеивания, метод медианных центров, метод выделения остатка и др. [3]. Недостаточное соответствие аппроксимирующей функции особенности формы экспериментальной кривой приводит к возникновению погрешности адекватности. В этой связи проблема формализации выбора формы математической модели и разработка методов анализа данных для определения параметров распределений является актуальной.

Информационно-измерительный квант и его свойства

Формализация выбора формы кривой значительно упрощается за счет использования информационно-измерительного кванта (ИИК), предложенного ранее в работе [4] для оценки естественной изменчивости при решении измерительных задач и для алгоритмизации накопления измерительной информации. Информационно-измерительный квант рассматривается как минимальное формирование некоторой математической структуры, отражающее суть вероятностных физических процессов, происходящих в моделируемом объекте. Основные свойства математической структуры и возможности ее применения для решения прикладных задач информационно-измерительной техники даны на диаграмме (рис. 1).

Для построения измерительного кванта предложено использовать совместную оценку текущего значения разности и ее нормированного значения, связанные с аддитивной и мультипликативной изменчивостью объекта исследования [4]. Квант должен иметь предельно малый размер и обладать всеми особенностями измерительной информации, необходимыми для формирования оценок погрешностей, порога чувствительности, разрешающей способности, числа различимых градаций.

В качестве основных свойств информационно-измерительного кванта в работе [4] выделены следующие качества математической структуры: свойство естественной изменчивости, которое можно интерпретировать как эквивалент информационно-измерительного обмена, и свойство алгоритмического накопления измерительной информации, необходимое для анализа метрологической надежности средств измерения и для синтеза методов, направленных на повышение надежности проводимых измерений.

Авторами работы предложено при проведении статистического моделирования для выбора формы математических моделей, анализа информации результатов измерений и установления соответствия математической модели результатам эксперимента использовать еще одно важное свойство информационно-измерительных квантов – свойство *отображения упорядоченности информации*, содержащееся в энтропии распределений квантов в результатах выборки измерения. В частности, рассмотрена возможность применения энтропии распределения информационно-измерительных квантов для поиска сложных форм математических аппроксимаций при построении статистических моделей.



Рис. 1. Диаграмма свойств и областей применения информационно-измерительного кванта

Структура информационно-измерительного кванта

В качестве кванта информации, предназначенного для формализованного выбора формы кривой математической модели и установления ее статистического соответствия результатам измерения, предлагается использовать минимальную дискретную единицу, построенную на основе произведения абсолютных и относительных погрешностей. Наиболее общая математическая структура погрешностей, позволяющая характеризовать свойства упорядоченности информации всей многомерной выборки результатов наблюдений, имеет вид [7]

$$\gamma = \prod_{i=1}^{N_{\Delta}} \Delta x_i \cdot \prod_{i=N_{\Delta}}^{N} \delta_{x i} .$$
⁽¹⁾

Здесь N – число независимых наблюдаемых переменных; N_{Δ} – число независимых наблюдаемых переменных, дискретные свойства которых характеризуются абсолютной погрешностью Δx_i ; $(N - N_{\Delta})$ – число независимых наблюдаемых переменных, дискретные свойства которых характеризуются относительными погрешностями δ_{x_i} .

Если в процессе эксперимента наблюдаются две переменные величины, то для двухмерной выборки результатов измерений строится двухмерный квант дискретизации измерений на основе абсолютной, относительной или приведенной погрешностей результатов. Если абсолютные погрешности результатов измерений равны Δx и Δy , то в качестве двухмерного кванта измерений можно принять величину их произведения [5–7]:

$$\gamma = \Delta x \Delta y \,. \tag{2}$$

Результатам измерений сопоставляется двухмерная площадь Δs_i фазовой выборки измерений, равная произведению значения ординаты y_i на интервал координаты наблюдения *i*-го результата $0.5(x_{i+1} - x_{i-1})$:

$$\Delta s_i = 0, 5 y_i (x_{i+1} - x_{i-1}).$$

Введение минимально измеряемой двухмерной неопределенности γ выборки измерений позволяет сопоставить каждому *i*-му результату измерений количество квантов дискретизации его двухмерной площади фазового пространства:

$$n_i = \frac{\Delta s_i}{\gamma}$$

и сформировать массив *p_i* вероятностей наблюдения квантов дискретизации в области *i*-го значения как отношение количества квантов дискретизации *i*-го результата к полному числу квантов дискретизации двухмерной выборки результатов (рис. 2).



Рис. 2. Процедура сопоставления *i*-му результату количества *n_i* квантов ү в двухмерном пространстве выборки измерений

Полученная вероятность p_i по своей физической природе выражает нормирование фазового пространства по суммарной площади B, ограниченной кривой и равной сумме двухмерных площадей фазового пространства всех m результатов двухмерной выборки измерений:

$$B = \sum_{i=1}^{m} \Delta s_i$$

Результат умножения суммарной площади *B* на вероятность *p_i* наблюдения квантов в фазовой области *i*-го измерения равен значению координаты *y_i* наблюдаемого двухмерного результата.

Вероятностный подход к моделированию эксперимента

Использование вероятности распределения для квантов дискретности измерения позволяет записать математическую модель аппроксимации двумерного массива результатов наблюдений в виде выражения

$$y(x) = B \cdot f(x) + y_0,$$
 (3)

где y_0 – постоянная составляющая смещения, f(x) – функция плотности распределения для двухмерных квантов дискретизации измерений в зависимости от координаты наблюдаемой величины x.

Таким образом, использование математической модели (1) позволяет рассматривать задачу построения регрессии как формальную задачу нахождения гипотезы распределения величины x положения квантов дискретизации для двухмерной выборки результатов измерений. Предложенный способ построения регрессии позволяет применить для нахождения функции f(x) методы установления справедливости для статистических гипотез, подробно описанных в современной литературе [12–15, 18].

Для установления правомерности выбора статистической гипотезы симметричных распределений широко распространен метод топографической классификации [3, 16, 17], в основу которого положена связь энтропии информации, содержащейся в результатах измерений, и формы аппроксимирующей кривой. Подобную взаимосвязь можно получить и для ряда несимметричных распределений [19], таких как распределение Вейбулла – Гнеденко, гамма распределение. Для этих распределений параметр формы однозначно связан с коэффициентом энтропии k_3 , что позволяет по энтропии информации, содержащейся в распределении, однозначно выбрать наиболее возможные формы распределений. В качестве примера на рис. 3 даны зависимости коэффициентов энтропии k_3 распределения Вейбулла – Гнеденко (кривая 1) и гамма распределения (кривая 2) от их параметров формы *с* в диапазоне $0, 2 \le c \le 1$. Формула для расчета коэффициента энтропии $k_3(c)$ по значению параметра формы распределения Вейбулла – Гнеденко

$$k_{\text{3-BF}}(c) = \frac{1}{c} \frac{e^{1+\beta\frac{c-1}{c}}}{\sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{c}+1\right)}},$$
(4)

где β – постоянная Эйлера: β = 0,5772157. При значении параметра формы равного 1 распределение Вейбулла – Гнеденко и гамма распределение переходят в экспоненциальное распределение с энтропией равной 1,922.

Коэффициент энтропии для значений *х* наблюдаемых двухмерных квантов дискретизации измерений рассчитывается из выражения

$$k_{s} = \frac{\exp(H_{x})}{2 \cdot \sigma_{x}}.$$
(5)

Здесь H(x) и $\sigma(x)$ – энтропия и среднее квадратическое отклонение значений x координат двухмерных квантов дискретизации измерений рассчитывается из выражений

$$H(x) = \sum_{i=1}^{N} p_i \cdot \ln\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{p_i}{\Delta x_i}\right), \ \mathbf{\sigma}_x = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} p_i \cdot x_i^2}.$$



Рис. 3. Зависимость коэффициента энтропии k_3 от параметра формы c: l – распределение Вейбулла – Гнеденко; 2 – гамма распределение

Алгоритм выбора и оценки параметров модели распределения

Последовательность проведения расчетов при построении регрессии дана на рис. 4 в форме алгоритма анализа энтропии для распределения координаты *x* двухмерных квантов дискретности измерений.



Рис. 4. Алгоритм выбора и оценки параметров модели на основе анализа энтропии распределения

После определения параметра формы регрессии методом моментов проводится определение остальных параметров статистического распределения: параметры масштаба, параметр сдвига. Для большинства распределений нахождение параметров распределения сводится к оценке математического ожидания и дисперсии.

Параметры масштаба *а* для рассмотренных выше распределения Вейбула – Гнеденко и гамма распределения могут быть найдены на основе моментов, так как математическое распределение и дисперсия несимметричных распределений связаны с его параметрами. Для проверки адекватности полученной регрессии двухмерной выборки результатов измерений следует воспользоваться известными критериями: *t*-критерием Стьюдента или *F*-критерием Фишера [12, 20].

В качестве достоинства предлагаемого подхода для построения регрессий следует отметить возможность формализации выбора формы математической зависимости между наблюдаемыми переменными.

Результаты

Методика применения информационно-измерительного кванта для построения регрессий была развита в рамках научно-исследовательской работы «Фундаментальные основы построения интеллектуальных информационно-измерительных систем для измерения параметров сложных электрических цепей и сигналов» (№ ГР 01201257173) [8]. Использование двухмерного информационно-измерительного кванта для построения модели взаимосвязи неопределенностей временных характеристик распространения автоволнового сигнала проводящей системы сердца позволит расширить возможности для прогнозирования атриовентрикулярных блокад 1^й, 2^й и 3^й степени (Патент РФ 2591839) [6, 9, 10]. Применение информационно-измерительного кванта к моделированию автоволновых процессов миокарда расширило возможности исследования его электрофизиологических характеристик [7, 11].

Библиографический список

- 1. *Брандт, 3.* Анализ данных. Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров / 3. Брандт. Москва : Мир, 2003. 686 с.
- 2. *Ткачев, С. В.* Планирование эксперимента для испытания датчиковой аппаратуры на метрологическую надежность / С. В. Ткачев, В. Д. Михотин. Пенза : Изд-во Пенз. гос. техн. ун-та, 1996. 184 с.
- 3. *Новицкий, П. В.* Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. Ленинград : Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
- 4. Осадчий, Е. П. Информационно-измерительный квант / Е. П. Осадчий, М. П. Берестень // Датчики и системы. 1999. № 1. С. 19–21.
- Полосин, В. Г. Использование информационно-измерительного кванта для исследования электрокардиосигнала / В. Г. Полосин, Н. В. Шпенглер, О. Н. Бодин // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы : тр. XXVI Всерос. науч.техн. конф. – Рязань, 2013. – С. 76–80
- 6. Полосин, В. Г. Разработка и исследование модели восстановления миокарда для прогнозирования АВ блокад / В. Г. Полосин, О. Н. Бодин, С. А. Балахонова // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2013. – № 12. – С. 59–64.
- 7. Полосин, В. Г. Информационно-измерительный квант энтропийно-параметрического потенциала электрокардиосигнала для исследования электрофизиологических характеристик сердца / В. Г. Полосин // Математическая биология и биоинформатика : материалы VI Междунар. конф. Пущино, 2016. С. 41–42.
- 8. НИР № ГР 01201257173. Отчет о научно-исследовательской работе. Фундаментальные основы построения интеллектуальных информационно-измерительных систем для измерения параметров сложных электрических цепей и сигналов / В. Г. Полосин, Е. А. Ломтев, Д. И. Нефедьев, О. Н. Бодин. – Пенза, 2014. – 122 с.
- 9. Пат. 2591839 Российская Федерация. Способ прогнозирования АВ-блокады I, II и III степени / Бодин О. Н., Полосин В. Г., Рахматуллов Ф. К., Логинов Д. С., Балахонова С. А.; заявл. 10.07.2015; опубл. 20.07.2016, Бюл. № 20.
- 10. Полосин, В. Г. Прогнозирование максимальной частоты сердечных сокращений для расчета интенсивности физических нагрузок / В. Г. Полосин, О. Н. Бодин, С. А. Бала-хонова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2013. № 1. С. 50–54.
- 11. Полосин, В. Г. Применение информационно-измерительного кванта для исследования электрофизиологических характеристик сердца / В. Г. Полосин // Вестник новых медицинских технологий. – 2017. – № 4. – DOI 10.12737/article 5a38cce58642a7.78002703. – URL: http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2017-4/1-5.pdf

http://www.incutsu.tulu.tu/v10011/Dulletiii/D201/ 4/1 5.put

82

- Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – Москва : Физматлит, 2006. – 816 с.
- Вадзинский, Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р. Н. Вадзинский. Санкт-Петербург : Наука, 2001. – 295 с.
- 14. Р 50.1.037–2002. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическими. Ч. П. Непараметрические критерии.
- 15. *Прохоров С. А.* Моделирование и анализ случайных процессов. Лабораторный практикум / С. А. Прохоров. СНЦ РАН, 2002. 227 с.
- Polosin, V. G. Information theoretic method for hypothesis testing with nonsymmetrical distributions / V. G. Polosin, P. P. Pershenkov // Measurement Techniques. 2014. Vol. 56, № 12. P. 1318–1322.
- 17. *Яшин, А. В.* Выбор метода решения задачи идентификации законов распределения случайных погрешностей средств измерений / А. В. Яшин, М. А. Лотонов // Измерительная техника. 2003. № 3. С. 3–5.
- 18. Губарев, В. В. Вероятностные модели. Справочник / В. В. Губарев. Новосибирск : НЭТИ, 1992. 422 с.
- 19. Полосин, В. Г. Система стохастического мониторинга состояния и электрофизиологических характеристик сердца : дис. ... д-ра техн. наук / Полосин В. Г. – Пенза, 2017. – 387 с.
- 20. *Дерффель, К.* Статистика в аналитической химии / К. Дерффель. Москва : Мир, 1994. 208 с.

References

- 1. Brandt Z. Analiz dannykh. Statisticheskie i vychislitel'nye metody dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Data analysis. Statistical and computational methods for scientists and engineers]. Moscow: Mir, 2003, 686 p. [In Russian]
- Tkachev S. V., Mikhotin V. D. *Planirovanie eksperimenta dlya ispytaniya datchikovoy apparatury na metrologicheskuyu nadezhnost'* [Design of experiments for the testing of sensor equipment for the metrological reliability]. Penza: Izd-vo Penz. gos. tekhn. un-ta, 1996, 184 p. [In Russian]
- 3. Novitskiy P. V., Zograf I. A. *Otsenka pogreshnostey rezul'tatov izmereniy* [Assessment of uncertainties of measurement results]. Leningrad: Energoatomizdat, 1985, 248 p. [In Russian]
- 4. Osadchiy E. P., Beresten' M. P. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 1999, no. 1, pp. 19–21. [In Russian]
- Polosin V. G., Shpengler N. V., Bodin O. N. Biotekhnicheskie, meditsinskie i ekologicheskie sistemy i kompleksy: tr. XXVI Vseros. nauch.-tekhn. konf. [Biotechnical, medical and ecological systems and complexes : proceedings of XXVI all-Russia. science.-tech. conf.]. Ryazan, 2013, pp. 76–80. [In Russian]
- 6. Polosin V. G., Bodin O. N., Balakhonova S. A. *Mekhatronika. Avtomatizatsiya. Upravlenie* [Mechatronics. Automation. Management]. 2013, no. 12, pp. 59–64. [In Russian]
- Polosin V. G. Matematicheskaya biologiya i bioinformatika: materialy VI Mezhdunar. konf. [Mathematical biology and bioinformatics : proceedings of the VI Intern. conf.]. Pushchino, 2016, pp. 41–42. [In Russian]
- NIR № GR 01201257173. Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote. Fundamental'-nye osnovy postroeniya intellektual'nykh informatsionno-izmeritel'nykh sistem dlya izmereniya parametrov slozhnykh elektricheskikh tsepey i signalov [Research project № GR 01201257173. Report on the research work. Fundamental bases of construction of intelligent information-measuring systems for measurement of parameters of complex electrical circuits and signals]. V. G. Polosin, E. A. Lomtev, D. I. Nefed'ev, O. N. Bodin. Penza, 2014, 122 p. [In Russian]
- Pat. 2591839 Russian Federation. Sposob prognozirovaniya AV-blokady I, II i III stepeni [Pat. 2591839 Russian Federation. A method of predicting AV-blockade of I, II and III degree]. Bodin O. N., Polosin V. G., Rakhmatullov F. K., Loginov D. C., Balakhonova S. A.; appl. 10.07.2015; publ. 20.07.2016, Bull. no. 20. [In Russian]
- Polosin V. G., Bodin O. N., Balakhonova S. A. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2013, no. 1, pp. 50–54. [In Russian]
- Polosin V. G. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy [Bulletin of new medical technologies]. 2017, no. 4. DOI 10.12737/article_5a38cce58642a7.78002703. Available at: http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2017-4/1-5.pdf [In Russian]
- 12. Kobzar' A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika*. *Dlya inzhenenrov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists]. Moscow: Fizmat-lit, 2006, 816 p. [In Russian]

- 13. Vadzinskiy R. N. *Spravochnik po veroyatnostnym raspredeleniyam* [Handbook of probability distributions]. Saint-Petersburg: Nauka, 2001, 295 p. [In Russian]
- 14. R 50.1.037–2002. Rekomendatsii po standartizatsii. Prikladnaya statistika. Pravila proverki soglasiya opytnogo raspredeleniya s teoreticheskimi. Ch. II. Neparametricheskie kriterii [P 50.1.037–2002. Recommendations for standardization. Applied statistics. Rules for checking the agreement of the experimental distribution with the theoretical. Part II. Non-parametric test]. [In Russian]
- 15. Prokhorov S. A. *Modelirovanie i analiz sluchaynykh protsessov. Laboratornyy praktikum* [Modeling and analysis of random processes. Laboratory practice]. SNTs RAN, 2002, 227 p. [In Russian]
- 16. Polosin V. G., Pershenkov P. P. Measurement Techniques. 2014, vol. 56, no. 12, pp. 1318–1322.
- 17. Yashin A. V., Lotonov M. A. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement technology]. 2003, no. 3, pp. 3–5. [In Russian]
- 18. Gubarev V. V. Veroyatnostnye modeli. Spravochnik [Probabilistic model. Handbook]. Novosibirsk: NETI, 1992, 422 p. [In Russian]
- 19. Polosin V. G. Sistema stokhasticheskogo monitoringa sostoyaniya i elektrofiziologicheskikh kharakteristik serdtsa: dis. d-ra tekhn. nauk [System of stochastic monitoring of heart condition and electrophysiological characteristics : dis. ... doc. tekhn. sciences]. Penza, 2017, 387 p. [In Russian]
- 20. Derffel' K. *Statistika v analiticheskoy khimii* [Statistics in analytical chemistry]. Moscow: Mir, 1994, 208 p. [In Russian]

Безбородова Оксана Евгеньевна

кандидат технических наук, доцент, кафедра техносферной безопасности, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: ot@.pnzgu.ru

Бодин Олег Николаевич

доктор технических наук, профессор, кафедра информационноизмерительной техники и метрологии, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: bodin_o@inbox.ru

Полосин Виталий Германович

доктор технических наук, профессор, кафедра медицинской кибернетики и информатики, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: polosin-vitalij@yandex.ru

Убиенных Анатолий Геннадьевич

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

Bezborodova Oksana Evgen'evna

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

Bodin Oleg Nikolaevich

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

Polosin Vitaly Germanovitch

doctor of technical sciences, professor, sub-department of medical cybernetics and informatics, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Ubiennykh Anatoliy Gennad'evich

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

Образец цитирования:

Безбородова, О. Е. Построение математической модели контролируемого объекта на основе анализа энтропии распределения информационно-измерительного кванта / О. Е. Безбородова, О. Н. Бодин, В. Г. Полосин, А. Г. Убиенных // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 76–84. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-9.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 620.1.08

DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-10

Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Д. В. Артамонов, А. М. Бибарсова, А. В. Лысенко

АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СИНТЕЗА ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ¹

E. A. Pecherskaya, P. E. Golubkov, O. V. Karpanin, D. V. Artamonov, A. M. Bibarsova, A. V. Lysenko

THE ALGORITHM OF FUNCTIONING OF THE INTELLECTUAL SYSTEM SYNTHESIS OF OXIDE COATINGS

Аннотация. Актуальность и цели. Актуальным направлением создания высокопрочных защитных покрытий на металлических деталях приборостроительной отрасли является процесс микродугового оксидирования. С целью повышения эффективности технологического процесса требуется его автоматизация, для осуществления которой авторами разработаны модель взаимодействия аппаратной части и программного обеспечения и алгоритм функционирования предложенной интеллектуальной системы синтеза оксидных покрытий. Материалы и методы. Рассмотрен алгоритм функционирования автоматизированного метода синтеза оксидных покрытий на образцах из вентильных металлов. При разработке алгоритма использованы методы системного анализа, что позволило реализовать два варианта работы интеллектуальной системы: исследование синтезированных покрытий и синтеза покрытий с заданными свойствами. Результаты. Создан алгоритм работы интеллектуального приложения управляемого синтеза оксидных покрытий, который анализирует полученные данные о технологических параметрах и свойствах синтезируемого покрытия, и при отклонении их от требуемых оптимальных значений, выявленных ранее, осуществляет корректировку технологического режима, управляя микроконтроллером. Выводы. Особенностью предложенного интеллектуального приложения является возможность реализации как задачи исследования параметров оксидных покрытий, так и синтеза покрытий с заданными свойствами. Благодаря этому интеллектуальная автоматизированная система может быть использована в научных исследованиях взаимосвязей разнородных технологических параметров и свойств оксидных покрытий и в производственных технологических процессах при синтезе МДО покрытий с требуемыми свойствами.

A b s t r a c t. *Background*. The actual direction of creating high-strength protective coatings on metal parts of the instrument-making industry is the process of microarc oxidation. In

© Печерская Е. А., Голубков П. Е., Карпанин О. В., Артамонов Д. В., Бибарсова А. М., Аысенко А. В., 2019

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-08-00425.

order to increase the efficiency of the technological process, its automation is required, for which the authors have developed a model of interaction between hardware and software and an algorithm for the functioning of the proposed intelligent system for the synthesis of oxide coatings. Materials and methods. The algorithm of functioning of an automated method for the synthesis of oxide coatings on samples from valve metals is considered. In developing the algorithm, systems analysis methods were used, which made it possible to implement two variants of the operation of an intelligent system: the study of synthesized coatings and the synthesis of coatings with desired properties. *Results*. An algorithm has been created for the operation of an intelligent application of controlled synthesis of oxide coatings, which analyzes the obtained data on technological parameters and properties of the synthesized coating, and if they deviate from the required optimal values identified earlier, it corrects the technological mode, controlling the microcontroller. *Conclusions*. A feature of the proposed intelligent application is the ability to implement both the task of studying the parameters of oxide coatings and the synthesis of coatings with desired properties. Due to this, an intelligent automated system can be used in scientific research on the interrelationships of heterogeneous technological parameters and properties of oxide coatings and in industrial technological processes in the synthesis of MAO coatings with the required properties.

Ключевые слова: процесс микродугового оксидирования, аппаратная часть, алгоритм, свойства оксидных покрытий, формовочная кривая.

K e y w o r d s: microarc oxidation process, hardware, algorithm, properties of oxide coatings, molding curve.

Введение

На современном этапе развития техники и технологий актуальной представляется проблема автоматизации процесса микродугового оксидирования (МДО), в частности, до сих пор остается нерешенной проблема его управляемости. Решению данной проблемы посвящено значительное количество теоретических и экспериментальных работ [1–10]. Основной трудностью, с которой сталкиваются при этом ученые, является большое количество факторов, которые в совокупности влияют на свойства МДО-покрытий и, как следствие, на параметры качества выпускаемых изделий. В работах [11, 12] на основе методологии управления качеством приведены результаты систематизации влияния технологических параметров на свойства оксидных покрытий.

Модель взаимодействия аппаратного и программного обеспечения интеллектуальной системы

В работе [13] представлена структура интеллектуальной автоматизированной системы управляемого синтеза (ИАСУС) МДО-покрытий, в состав которой входит аппаратная часть, программное обспечение (ПО) и информационное наполнение. Реализованные методы измерений параметров изложены, в частности, в работах [14, 15].

Модель взаимодействия аппаратного и программного обеспечения ИАСУС показана на рис. 1.

В процессе работы системы клиентское ПО, интеллектуальное приложение управляемого синтеза (ИПУС), серверное ПО и ПО микроконтроллера обмениваются пакетами данных. ПО микроконтроллера посредством аналоговых сигналов управляет работой источника технологического тока (ИТТ) и принимает сигналы с измерительных преобразователей, которые после аналого-цифрового преобразования и передачи через USB-интерфейс становятся доступны ИПУС. ИПУС анализирует полученные данные о технологических параметрах и свойствах синтезируемого покрытия и при отклонении их от требуемых оптимальных значений, выявленных ранее, осуществляет корректировку технологического режима, управляя микроконтроллером (рис. 1,a).

Такое поведение аналогично наличию обратной связи между измерительными преобразователями, ИПУС и ИТТ (рис. 1,6), позволяющей гарантировать поддержание оптимальных технологических параметров процесса МДО на протяжении всего времени обработки.



Рис. 1. Модель взаимодействия аппаратного и программного обеспечения интеллектуальной системы

Алгоритм функционирования интеллектуальной системы

Общий алгоритм функционирования ПО ИАСУС представлен на рис. 2.



Рис. 2. Укрупненный алгоритм функционирования интеллектуальной системы

В начале работы оператору необходимо задать вид выполняемых работ: экспериментальные исследования (вариант 1) или получение МДО-покрытий с заданными свойствами (вариант 2). Если выбран вариант 1, оператору будет предложен выбор исследуемой взаимосвязи «технологический параметр процесса МДО – свойство МДО-покрытий» на графовом интерфейсе [16]. При этом процесс МДО будет осуществляться по технологическим параметрам, заданным пользователем, которые в общем случае не являются оптимальными и служат лишь для уточнения математических моделей процесса МДО. Если выбран вариант 2, интеллектуальное приложение на основе анализа данных, имеющихся в базе знаний (БЗ), предложит оператору несколько оптимальных режимов обработки, исходя из конструктивнотехнологических и технико-экономических требований.

Далее система предлагает оператору ввести необходимые параметры технологического процесса (плотность тока, время обработки, соотношение анодного и катодного токов, частоту импульсов ИТТ, формовочное напряжение, температуру и начальный состав электролита) (для варианта 1) либо требуемые свойства (толщину, микротвердость, пористость) или параметры качества покрытия (износостойкость, коррозионная стойкость, электрическая прочность, тепловое сопротивление), характеристики детали (площадь поверхности, название сплава (если известно), или по крайней мере его основной компонент, шероховатость поверхности (если известна).

Также требования к покрытию для варианта 2 можно ввести с помощью ограничивающих условий. Например, если требуется получить коррозионно-стойкое покрытие, необходимо явно задать значение коррозионной стойкости и толщины, а пористость при этом должна быть минимально возможной. Задаваемая площадь поверхности детали неявно ограничивает минимально допустимую плотность тока, ниже которой процесс МДО практически не выполняется. Ограничивающими условиями также могут выступать технико-экономические показатели. Например, параметр «количество обработанных деталей за смену» ограничивает максимальное время обработки 1 дм² поверхности заготовки, а себестоимость 1 дм² покрытия ограничивает расход электроэнергии (в кВт.ч) за время обработки одной детали.

Рассмотрим алгоритм получения оптимальных технологических параметров процесса МДО интеллектуальным приложением управляемого синтеза на примере конкретной задачи синтеза коррозионно-стойкого МДО-покрытия. Имеем следующие исходные данные:

- коррозионная стойкость CR = CR1;

– толщина МДО-покрытия h = h1;

– начальный состав электролита. Обозначим концентрацию первого компонента (например, Na₂SiO₃) C1, а второго компонента (KOH) – C2. Состав электролита можно определить и автоматически, измерив выработку;

– шероховатость поверхности детали *S* (определяется конструктивно-технологическими требованиями на заготовку и параметрами станка);

- состав сплава (или его основной компонент).

Кроме того, имеем следующие ограничивающие условия (*jmin*, *jmax*, *Tmin*, Tmax – минимальные и максимальные допустимые значения технологических параметров):

– условие минимальной пористости;

– условие минимального времени обработки;

- диапазон плотностей тока $j \in [jmin; jmax];$

– диапазон температур электролита $T \in [Tmin; Tmax]$.

Если точный состав сплава неизвестен, а известен только его основной компонент (например, алюминиевый, титановый сплав), запускается алгоритм идентификации сплава. Его работа основана на том факте, что зависимость формовочного напряжения U от времени МДО-обработки t (формовочная кривая, Φ K) имеет разные угловые коэффициенты для разных сплавов (рис. 3) (каждую стадию процесса МДО на Φ K можно аппроксимировать прямыми линиями).

Таким образом, для идентификации сплава достаточно измерить ФК исследуемого образца при минимально допустимой плотности тока на стадии анодирования (область 1 на рис. 3), продолжительностью в несколько секунд, аппроксимировать ее методом наименьших квадратов и определить угловой коэффициент получившейся прямой через производную

$$k = \frac{\partial U}{\partial t} \,.$$



500

400



Рис. 3. Зависимость формовочного напряжения U от времени МДО-обработки t

Далее происходит сравнение полученного углового коэффициента со значениями угловых коэффициентов для разных сплавов из БЗ математических моделей (ММ) процесса МДО с учетом погрешности измерения, и при равенстве этих коэффициентов определяется соответствующий сплав.

Затем с помощью разработанных алгоритмов управляемого синтеза происходит определение оптимальных технологических параметров процесса МДО для данного сплава по имеющимся исходным данным и с учетом ограничивающих условий с использованием информации, содержащейся в банке знаний. В результате работы подпрограммы управляемого синтеза получаем совокупность значений технологических параметров, при которых достигается требуемая толщина h_1 (разные способы нанесения покрытия):

> Way $1:j_1,t_1,T_1,(I_C/I_A)_1,U_F,f_1,p_{Al},C_1,C_2,$ Way $2:j_2,t_2,T_2,(I_C/I_A)_2,U_{F_2},f_2,p_{Al},C_1,C_2,$ Way $i:j_i,t_i,T_i,(I_C/I_A)_i,U_{F_i},f_i,p_{Al},C_1,C_2,$ Way $n:j_n,t_n,T_n,(I_C/I_A)_n,U_{F_n},f_n,p_{Al},C_1,C_2,$

где j – плотность тока; t – время МДО-обработки; T, C_1 , C_2 – температура и концентрация компонентов электролита соответственно; I_C/I_A – соотношение анодного и катодного токов; U_F – формовочное напряжение; f – частота импульсов технологического тока; p_{A1} – процентное содержание алюминия в исходном сплаве, а индекс 1, 2, i, n – номер набора технологических параметров. Затем эти выражения в виде, удобном для восприятия, отображаются на экране компьютера, и оператор, исходя из своих предпочтений, выбирает один из способов нанесения покрытия и запускает процесс МДО.

После этого полученные данные о выбранном оптимальном режиме обработки передаются серверному ПО и ПО микроконтроллера, которое и осуществляет управление технологическим оборудованием. После ввода параметров необходимо проверить готовность системы по состоянию концевого выключателя защитного ограждения. Если защитное ограждение открыто, ИТТ отключается, а на экран выводится соответствующее сообщение, и работа программы продолжится только при закрытии защитного ограждения.

Далее проверяется состояние электролита путем измерения выработки, и если электролит не соответствует требованиям, выводится сообщение о его замене.

После проведения подготовительных процедур начинается непосредственно процесс МДО. При этом возможно выполнение нескольких независимых задач:

- МДО-обработка;
- измерение тока;
- измерение напряжения;
- измерение толщины МДО-покрытия;
- измерение яркости микроразрядов;
- измерение температуры электролита;
- измерение выработки электролита;
- измерение мутности электролита.

При этом основной задачей является МДО-обработка, так как она задействует ИТТ, а все остальные задачи выполняются одновременно с ней. Такое количество задач свидетельствует о необходимости разработки для микроконтроллера собственной операционной системы, причем номер задачи будет задаваться ИПУС.

Измерение тока и напряжения на образце позволяет строить формовочные кривые процесса МДО и динамические вольтамперные характеристики (ВАХ) (зависимости напряжения от тока за один период сигнала ИТТ), а также определять по ним стадию процесса МДО, напряжение зажигания и гашения микроразряда. При этом если МДО-процесс достиг начала дуговой стадии, ИТТ отключается и на экран компьютера выводится сообщение об окончании МДО-обработки. Также возможно определение стадийности процесса МДО на основе измерения яркости микроразрядов.

Измерение толщины МДО-покрытий в реальном времени дает возможность строить ее временные зависимости и на их основе выводить математические модели процесса МДО, пополняя таким образом банк знаний. Толщина МДО-покрытий определяется путем измерения емкости МДО-покрытия с использованием частотного интегрирующего развертывающего преобразователя (ЧИРП) оригинальной конструкции [16].

Измерение временных зависимостей выработки электролита позволит установить срок его службы, а также разработать рекомендации по корректировке состава электролита по мере его обеднения ионами. Выработка электролита определяется путем измерения емкости конденсатора с электролитом в качестве диэлектрика при помощи второго ЧИРП. Следует отметить, что перед каждой МДО-обработкой ИПУС осуществляет корректировку данных о составе электролита, измеряя его выработку.

Температура электролита измеряется интегральным диодным датчиком типа LM35 и поддерживается на оптимальном уровне ИПУС, управляющей также системой охлаждения и перемешивания электролита. Если необходимо получить временные зависимости температуры электролита либо температурные зависимости свойств МДО-покрытия, система охлаждения и перемешивания электролита должна быть отключена либо температура должна изменяться дискретно с малым шагом соответственно.

Измерение мутности электролита дает возможность установить зависимость интенсивности шламовыделения от мощности микроразрядов, а также оценить эффективность работы системы охлаждения и перемешивания электролита [17].

После завершения процесса МДО все полученные зависимости и режимы обработки сохраняются в соответствующих базах знаний для дальнейшей обработки и уточнения математических моделей МДО-процесса.

Заключение

Предложена модель взаимодействия аппаратного и программного обеспечения интеллектуальной системы синтеза оксидных покрытий, которая служит основой для разработки алгоритма ее функционирования. Особенностью рассматриваемой системы является возможность реализации как задачи синтеза покрытий с заданными свойствами, так и задачи исследования параметров оксидных покрытий. Благодаря этому интеллектуальная автоматизированная система может быть использована в научных исследованиях взаимосвязей разнородных технологических параметров и свойств МДО покрытий, а также в производственных технологических процессах при синтезе покрытий с требуемыми свойствами.

Библиографический список

- Wei, F. Effect of variations of Al content on microstructure and corrosion resistance of PEO coatings on Mg-Al alloys / F. Wei, W. Zhang, T. Zhang, F. Wang // J. of Alloys and Compounds. 2017. Vol. 690. P. 195–205. DOI 10.1016/J.JALLCOM.2016.08.111.
- Mohedano, M. Role of particle type and concentration on characteristics of PEO coatings on AM50 magnesium alloy / M. Mohedano, B. Mingo, R. Arrabal, A. Pardo // Surf. & Coat. Technol. – 2018. – Vol. 334. – P. 328–335. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2017.11.058.
- Correlation between plasma electrolytic oxidation treatment stages and coating microstructure on aluminum under unipolar pulsed DC mode / V. Dehnavi, B. L. Luan, X. Y. Liu, D. W. Shoesmith, S. Rohani // Surf. & Coat. Technol. 2015. Vol. 269. P. 91–99. DOI 10.1016/j.surfcoat.2014.11.007.
- Preparation of thermal control coatings on Ti alloy by plasma electrolytic oxidation in K2ZrF6 solution / Z. Yao, P. Su, Q. Shen, P. Ju, C. Wu, Y. Zhai, Z. Jiang // Surf. & Coat. Technol. – 2015. – Vol. 269. – P. 273–278.
- Effect of nanocrystalline surface of substrate on microstructure and wetting of PEO coatings / H. R. Masiha, H. R. Bagheri, M. Gheytani, M. Aliofkhazraei, A. Sabour Rouhaghdam, T. Shahrabi. // Bull. Mater. Sci. – 2015. – Vol. 38, № 4. – P. 935–943.
- Gao, Y. Effect of current mode on PEO treatment of magnesium in Ca- and P-containing electrolyte and resulting coatings / Y. Gao, A. Yerokhin, A. Matthews // Appl. Surf. Sci. 2014. – Vol. 316. – P. 558–567. – DOI 10.1016/j.apsusc.2014.08.035.
- Nabavi, H. F. Morphology and corrosion resistance of hybrid plasma electrolytic oxidation on CP-Ti / H. F. Nabavi, M. Aliofkhazraei, A. S. Rouhaghdam // Surf. & Coat. Technol. – 2017. – Vol. 322. – P. 59–69. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2017.05.035.
- Effects of electric parameters on structure and thermal control property of PEO ceramic coatings on Ti alloys / Q. Xia, J. Wang, G. Liu, H. Wei, D. Li, Z. Yao, Z. Jiang, C. Chen // Surf. & Coat. Technol. 2016. Vol. 307. P. 1284–1290.
- Cheng, Y. The effects of anion deposition and negative pulse on the behaviours of plasma electrolytic oxidation (PEO) – A systematic study of the PEO of a Zirlo alloy in aluminate electrolytes / Y. Cheng, T. Wang, S. Li, Yu. Cheng // Elect. Acta. – 2017. – Vol. 225. – P. 47–68. – DOI 10.1016/j.electacta.2016.12.115.
- Казанцев, И. А. Износостойкость композиционных материалов на основе титана, полученных микродуговым оксидированием / И. А. Казанцев, А. О. Кривенков, А. Е. Розен, С. Н. Чугунов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 1 (5). – С. 159–164.
- Golubkov, P. E. Methods of applying the reliability theory for the analysis of micro-arc oxidation process» / P. E. Golubkov, E. A. Pecherskaya, O. V. Karpanin, Y. V. Shepeleva // IOP Conf. Series: J. of Phys.: Conf. Series. 2018. Vol. 1124. P. 081014. DOI 10.1088/1742-6596/1124/8/081014.
- Голубков, П. Е. Применение инструментов контроля качества для анализа процесса микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, Е. А. Печерская, А. В. Мартынов // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : тез. докл. III Всерос. молодежной науч. конф. – Тамбов, 2018. – С. 111–113.
- Automation of the micro arc oxidation process / P. E. Golubkov, E. A., Pecherskaya, O. V. Karpanin, Y. V. Shepeleva, T. O. Zinchenko, D. V. Artamonov // Journal of Physics: Conf. Series. – 2017. – № 917. – P. 092021. – DOI 10.1088/1742-6596/917/9/092021.
- 14. Автоматизированная исследовательская технологическая установка микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, Е. А. Печерская, О. В. Карпанин, Ю. В. Шепелева, Т. О. Зинченко, Д. В. Артамонов // Наноструктурированные оксидные пленки и покрытия : сб. ст. по материалам IV Междунар. молодежной науч. школы-семинара. – Петрозаводск, 2017. – С. 103–114.
- Голубков, П. Е. Методы измерения температуры в процессе микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, А. В. Мартынов, Е. А. Печерская // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. V Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. / под ред. Л. Р. Фионовой. Пенза, 2018. С. 245–248.
- Vasil'ev, V. A. The structure of the universal micromodule of the integrating scanning frequency converter / V. A. Vasil'ev, N. V. Gromkov, A. J. Joao // Proc. Dynamics Conf. – Omsk, 2016. – № 7819105. – DOI 10.1109/Dynamics.2016.7819105.
- Голубков, П. Е. Методы измерения выработки электролита в процессе микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, Е. А. Печерская // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : материалы Междунар. науч.техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения В. М. Шляндина. – Пенза, 2018. – С. 121–124.

References

- 1. Wei F., Zhang W., Zhang T., Wang F. J. of Alloys and Compounds. 2017, vol. 690, pp. 195–205. DOI 10.1016/J.JALLCOM.2016.08.111.
- Mohedano M., Mingo B., Arrabal R., Pardo A. Surf. & Coat. Technol. 2018, vol. 334, pp. 328–335. DOI 10.1016/j.surfcoat.2017.11.058.
- 3. Dehnavi V., Luan B. L., Liu X. Y., Shoesmith D. W., Rohani S. *Surf. & Coat. Technol.* 2015, vol. 269, pp. 91–99. DOI 10.1016/j.surfcoat.2014.11.007.
- 4. Yao Z., Su P., Shen Q., Ju P., Wu C., Zhai Y., Jiang Z. Surf. & Coat. Technol. 2015, vol. 269, pp. 273–278.
- 5. Masiha H. R., Bagheri H. R., Gheytani M., Aliofkhazraei M., A. Sabour Rouhaghdam, Shahrabi T. *Bull. Mater. Sci.* 2015, vol. 38, no. 4, pp. 935–943.
- 6. Gao Y., Yerokhin A., Matthews A. *Appl. Surf. Sci.* 2014, vol. 316, pp. 558–567. DOI 10.1016/j.apsusc.2014.08.035.
- Nabavi H. F., Aliofkhazraei M., Rouhaghdam A. S. Surf. & Coat. Technol. 2017, vol. 322, pp. 59–69. DOI 10.1016/j.surfcoat.2017.05.035.
- Xia Q., Wang J., Liu G., Wei H., Li D., Yao Z., Jiang Z., Chen C. Surf. & Coat. Technol. 2016, vol. 307, pp. 1284–1290.
- Cheng Y., Wang T., Li S., Cheng Yu. *Elect. Acta.* 2017, vol. 225, pp. 47–68. DOI 10.1016/j.electacta.2016.12.115.
- 10. Kazantsev I. A., Krivenkov A. O., Rozen A. E., Chugunov S. N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2008, no. 1 (5), pp. 159–164. [In Russian]
- 11. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Karpanin O. V., Shepeleva Y. V. *IOP Conf. Series: J. of Phys.: Conf. Series.* 2018, vol. 1124, pp. 081014. DOI 10.1088/1742-6596/1124/8/081014.
- 12. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Martynov A. V. Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya: tez. dokl. III Vseros. molodezhnoy nauch. konf. [Radionics. Problems and prospects of development : abstracts of III all-Russia. youth science. conf.]. Tambov, 2018, pp. 111–113. [In Russian]
- Golubkov P. E., Pecherskaya E. A, Karpanin O. V., Shepeleva Y. V., Zinchenko T. O., Artamonov D. V. Journal of Physics: Conf. Series. 2017, no. 917, pp. 092021. DOI 10.1088/1742-6596/917/9/092021.
- Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Karpanin O. V., Shepeleva Yu. V., Zinchenko T. O., Artamonov D. V. Nanostrukturirovannye oksidnye plenki i pokrytiya: sb. st. po materialam IV Mezhdunar. molodezhnoy nauch. shkoly-seminara [Nanostructured oxide films and coatings : collection of articles on materials of IV International youth scientific. schoolseminar's]. Petrozavodsk, 2017, pp. 103–114. [In Russian]
- Golubkov P. E., Martynov A. V., Pecherskaya E. A. Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sb. nauch. st. V Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. [Information technologies in science and education. Problems and prospects : collection of scientific articles V all-Russian interuniversity. science.-prakt. conf.]. Penza, 2018, pp. 245–248. [In Russian]
- Vasil'ev V. A., Gromkov N. V., Joao A. J. Proc. Dynamics Conf. Omsk, 2016, no. 7819105. DOI 10.1109/Dynamics.2016.7819105.
- Golubkov P. E., Pecherskaya E. A. Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 100-letiyu so dnya rozhdeniya V. M. Shlyandina [Methods, means and technologies of obtaining and processing of measuring information : materials international. science.-tech. conf. dedicated to 100 anniversary of the birth of V. M. Shlyandina]. Penza, 2018, pp. 121–124. [In Russian]

Печерская Екатерина Анатольевна

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационноизмерительной техники и метрологии, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: pea1@list.ru

Pecherskaya Ekaterina Anatolevna

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

2019, N^{0} 2 (28)

Голубков Павел Евгеньевич

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

Карпанин Олег Валентинович

старший преподаватель, кафедра нано- и микроэлектроники, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: karpanino@mail.ru

Артамонов Дмитрий Владимирович

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

Бибарсова Алия Мухамеджановна

кандидат медицинских наук, доцент, заместитель декана, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: bibarsova_pgu@mail.ru

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

Golubkov Pavel Evgenevich

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

Karpanin Oleg Valentinovich

senior lecturer, sub-department of nano-and microelectronics, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Artamonov Dmitriy Vladimirovich

doctor of technical sciences, professor, first Vice-Rector, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Bibarsova Aliya Muhamedjanovna

candidate of medical sciences, associate professor, deputy dean, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Lysenko Alexey Vladimirovich

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

Образец цитирования:

Алгоритм функционирования интеллектуальной системы синтеза оксидных покрытий / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Д. В. Артамонов, А. М. Бибарсова, А. В. Лысенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 85–93. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-10.

УДК 621.791.052

DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-11

В. Е. Пауткин

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНОДНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

V. E. Pautkin

PHYSICAL AND CHEMICAL BASES OF THE ANODE COMPOUND OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS ELEMENTS

Аннотация. Актуальность и цели. Рассмотрены физико-химические основы формирования чувствительных элементов микромеханических акселерометров методами анодного соединения. Целью работы является анализ физических эффектов, приводящих к созданию неразъемного соединения деталей. Материалы и методы. При рассмотрении данного вопроса использованы положения физической химии, физики твердого тела. Результаты. Предложены рекомендации для улучшения процесса анодного соединения «кремний-стекло». Выводы. Применение анодного соединения при сборке чувствительных элементов позволяет создавать датчики, отличающиеся малыми габаритами, высокими эксплуатационными характеристиками.

A b s t r a c t. *Background*. The physicochemical principles of the formation of sensitive elements of micromechanical accelerometers by the methods of anode connection are considered. The aim of the work is to analyze the physical effects leading to the creation of a permanent connection of parts. *Materials and methods*. Used the provisions of physical chemistry, solid state physics in the consideration of this issue. *Results*. Recommendations for improving the anodic silicon-glass process are proposed. *Conclusions*. The use of anode connection in the assembly of sensitive elements allows you to create sensors that are characterized by small dimensions, high performance.

Ключевые слова: анодное соединение, щелочное стекло, твердофазный электролиз, чувствительный элемент, датчик.

K e y w o r d s: anodic compound, alkaline glass, solid-phase electrolysis, sensitive element, sensor.

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) – направление в технике, получившее широкое распространение в технологии приборостроения при создании датчиков различного назначения, в том числе датчиков давления, ускорения, угловой скорости и т.п. [1, 2]. Технология МЭМС-датчиков, содержащих чувствительные элементы, по крайней мере одна из деталей которого выполнена из кремния, известна как кремниевая микромеханика [3]. В настоящее время кремниевая микромеханика позволяет выполнять миниатюрные чувствительные элементы таких датчиков, как например, датчиков ускорения, давления, которые при этом носят название микромеханических.

Конструктивно чувствительный элемент микромеханического датчика содержит кремниевый кристалл, соединенный со стеклянной пластиной. В случае микромеханического акселерометра кристалл соединен со стеклянными пластинами с обеих сторон (рис. 1).

© Пауткин В. Е., 2019



Рис. 1. Чувствительные элементы: *a* – датчика абсолютного давления: *l* – стеклянная пластина; *2* – кремниевый кристалл; *3* – изолирующий оксид кремния; *4* – металлизация; *5* – пьезорезисторы; *б* – датчика ускорения: *l* – кремниевая пластина; *2*, *3* – стеклянные пластины; *4* – металлизация

Технология сборки данных чувствительных элементов обеспечивает получение жесткого неразъемного соединения деталей. Прочность зоны соединения оказывается выше прочности соединяемых материалов [4]. При этом особый интерес вызывают физико-химические эффекты, приводящие к получению данного соединения.

Анодное соединение, также известное как электростатическое соединение, открыто Уоллисом и Померанцем в качестве метода соединения металла с натриевым стеклом [5]. В настоящее время данный способ используется для соединения кремния со стеклом. При этом к стеклу предъявляются особые требования, а именно, наличие ионов щелочного металла, чаще всего натрия Na, входящего в состав стекол в виде оксида натрия Na₂O. Содержание ионов натрия в стекле необходимо для проведения процесса сборки чувствительного элемента. Другим важным требованием является соответствие коэффициента термического линейного расширения (КТЛР) стекла КТЛР кремния. К числу таких стекол можно отнести стекла марок ЛК 5 (РФ), Borofloat 33 («Schott», Германия), Ноуа (Япония).

При сборке чувствительных элементов в специальных технологических приспособлениях детали – кремниевая и стеклянная пластина – приводятся в тесный контакт. Сборка нагревается до температуры (400–460) °С. При такой температуре оксид натрия Na₂O, входящий в состав щелочного стекла (~4,0 % по составу), распадается на ионы натрия Na⁺ и кислорода O²⁻. На сборку подается постоянное напряжение (400–800) В в зависимости от конструкции чувствительного элемента и толщины используемых пластин. На кремниевую пластину подается положительный потенциал, на стеклянные детали подается отрицательный потенциал. В стеклянных деталях под действием напряжения возникает ионный электрический ток из-за движения положительных ионов натрия Na⁺ и отрицательных ионов кислорода O²⁻ (рис. 2).





Для появления ионного тока необходима активация движения ионов натрия и кислорода. Она может быть описана моделью Андерсона – Стюарта [6]. Согласно данной модели для диффузии иона и перемещения его в новое положение необходимо разрушение связи между ним и окружающими ионами в стекле. При диффузии ион должен преодолеть узкое пространство между соседними пустотами, существующими в структурной сетке стекла. Энергия активации электропроводности представляет сумму двух независимых членов

$$E_{\sigma} = E_b + E_S$$
,

где E_b – энергия электростатической связи, необходимая для разрыва локальной связи; E_s – энергия деформации, необходимая для продвижения иона между соседними пустотами. Авторами данной модели предложены следующие зависимости:

вторами даннои модели предложены следующие зависимости

$$E_b = \frac{\beta z z_0 e^2}{\gamma (r + r_0)},$$

где β – фактор, учитывающий расстояние между позициями катионов и анионов в структурной сетке стекла; *z* и *r* – заряд и радиус катиона; *z*₀ и *r*₀ – заряд и радиус аниона; *e* – заряд электрона; γ – степень ковалентности, равная диэлектрической постоянной стекла.

Энергия деформации описывается следующим уравнением:

$$E_s = 4\pi G r_d \left(r - r_d \right)^2$$

где *G* – модуль сдвига стекла; *r*_d – диаметр отверстия между соседними пустотами.

Как видно из представленной модели, энергия активации электропроводности зависит от диэлектрической постоянной стекла, расстояния между позициями катионов и анионов, а также диаметра отверстий в структурной сетке стекла.

На практике, на стороне стеклянной пластины, обращенной к металлическому электроду, происходит выделение металлического натрия. Таким образом, в щелочных стеклах при высоких температурах и постоянном напряжении происходит электролиз в твердой фазе, о чем свидетельствует выделение металлического натрия. На границе кремний-стекло из-за взаимодействия ионов кислорода с кремнием происходит образование тонкого слоя SiO₂, который ответственен за формирование неразъемного соединения деталей.

При анодном соединении также присутствует эффект, названный эффектом Джонсона-Рабека. Джонсон и Рабек исследовали силу притяжения между полупроводниковой пластиной (в качестве диэлектрика с низким удельным сопротивлением) и металлической пластиной в присутствии электрического поля [7]. Ими было обнаружено, что фактическая сила притяжения между пластинами оказалась намного выше, чем было рассчитано по известной формуле силы электростатического притяжения:

$$F = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 S U^2}{2x^2},$$

где $\varepsilon_0 = 8,85418 \cdot 10^{-12} \, \Phi/M$ – диэлектрическая проницаемость вакуума; ε_1 – диэлектрическая проницаемость кремния; ε_2 – диэлектрическая проницаемость стекла; *S* – площадь контакта; *U* – напряжение, подаваемое на пластины; *x*–зазор между пластинами.

Экспериментальный эффект объяснялся предположением о том, что в диэлектрическом слое непосредственно на контактной границе электродов находятся постоянные электрические заряды. При этом были обнаружены небольшие электрические токи на границе раздела электродных пластин, увеличивающие силу трения соприкасающихся поверхностей при их соединении. Увеличение силы трения, помимо воздействующих электростатических сил, также способствует образованию более тесного контакта поверхностей, сильно зависящего от шероховатости поверхности обеих пластин.

На практике не существует топографически гладких поверхностей. Все твердые поверхности, в том числе поверхность кремниевой и стеклянной пластин, являются сравнительно грубыми в нанометровых масштабах. Однако после анодного соединения из-за силы электростатического притяжения, эффекта Джонсона – Рабека, поверхность раздела стеклянной и кремниевой пластин становится практически плоской (рис. 3).



Рис. 3. Граница раздела «кремний-стекло» до (а) и после (б) анодного соединения

Понимание механизмов анодного соединения способствует оптимизации технологического процесса сборки чувствительных элементов. Для улучшения параметров процесса электростатического соединения необходим тщательный подбор марок щелочного стекла для соединения с кремниевыми пластинами, применение пластин с минимально возможной шероховатостью поверхности, а также тщательный контроль параметров процесса анодного соединения, таких как температура, подаваемое напряжение.

Применение анодного соединения при сборке чувствительных элементов позволяет создавать датчики, отличающиеся малыми габаритами и массой, высокими эксплуатационными характеристиками.

Библиографический список

- 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. *Мокров, Е. А.* Акселерометры НИИ Физических Измерений элементы микросистемотехники / Е. А. Мокров, А. А. Папко // Микросистемная техника. – 2002. – № 1. – С. 3–9.
- Аверин, И. А. Особенности формирования микроэлектромеханических элементов первичных преобразователей информации / И. А. Аверин, В. Е. Пауткин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2014. № 2 (30). С. 24–32.
- 4. *Козин, С. А.* Разработка технологии и специального оборудования для соединения кремния со стеклом в поле высокого напряжения / С. А. Козин, А. В. Федулов, В. Е. Пауткин // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 46–47.
- 5. Косогоров, В. М. Разработка технологии электростатического соединения многослойных стеклокремниевых структур / В. М. Косогоров, А. В. Федулов, В. Е. Пауткин // Датчики и системы. 2000. № 7. С. 59–60.
- 6. *Шелби, Дж.* Структура, свойства и технологии стекла / Дж. Шелби ; пер. с англ. Е. Ф. Медведева. Москва : Мир, 2006. 288 с.
- Atkinson, R. A simple theory of the Johnsen-Rahbek effect / R. Atkinson // Journal of Physics D: Applied Physics. – Vol. 2, № 3. – P. 325–333.

References

- Dmitrienko A. G., Papko A. A., Torgashin S. I., Kiryanina I. V. *Izmerenie. Monitoring. Up-ravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2013, no. 3 (5), pp. 45–53. [In Russian]
- 2. Mokrov E. A., Papko A. A. *Mikrosistemnaya tekhnika* [Microsystem technology]. 2002, no. 1, pp. 3–9. [In Russian]
- Averin I. A., Pautkin V. E. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2014, no. 2 (30), pp. 24–32. [In Russian]
- 4. Kozin S. A., Fedulov A. V., Pautkin V. E. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2005, no. 9, pp. 46–47. [In Russian]
- 5. Kosogorov V. M., Fedulov A. V., Pautkin V. E. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2000, no. 7, pp. 59–60. [In Russian]

98

Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

- 6. Shelbi Dzh. *Struktura, svoystva i tekhnologii stekla* [Structure, properties and technologies of glass]. Transl. from Engl. by E. F. Medvedev. Moscow: Mir, 2006, 288 p. [In Russian]
- Atkinson R. *Journal of Physics D: Applied Physics*. Vol. 2, no. 3, pp. 325–333.

Пауткин	Валерий	Евгеньевич
---------	---------	------------

кандидат технических наук, главный специалист, Научно-исследовательский институт физических измерений (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10) E-mail:gorvlad1@yandex.ru

Pautkin Valeriy Evgen'evich

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

Образец цитирования:

Пауткин, В. Е. Физико-химические основы анодного соединения элементов МЭМС / В. Е. Пауткин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 94–98. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-11. Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Г. В. Козлов, А. В. Печерский

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЯЕМОГО СИНТЕЗА ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ¹

E. A. Pecherskaya, P. E. Golubkov, O. V. Karpanin, G. V. Kozlov, A. V. Pecherskiy

INTELLECTUAL SYSTEM OF CONTROLLED SYNTHESIS OF OXIDE COATINGS

Аннотация. Актуальность и цели. Микродуговое оксидирование (МДО) является перспективным способом получения прочных оксидных покрытий посредством плазмохимической обработки деталей из вентильных металлов и сплавов. До настоящего времени данный процесс имеет ограниченное применение по причине отсутствия системного описания взаимосвязей между технологическими параметрами и свойствами покрытий. Цель работы заключается в разработке интеллектуальной системы, позволяющей как синтезировать покрытия с заданными свойствами, так и исследовать свойства покрытий с целью установления влияния на них разнородных факторов. Материалы и методы. МДО представляет собой плазмохимический метод упрочнения образцов из вентильных металлов, обладающих униполярной проводимостью в системе «металлоксид-электролит», таких как алюминий, магний или титан. Покрытия, синтезируемые данным методом, представляют собой оксидный слой, состоящий из высокотемпературных кристаллических модификаций оксида алюминия. Для получения оксидных покрытий использована гальваническая ячейка – ванна с электролитом, в которую погружены два электрода – анод (деталь из вентильного металла) и катод из нержавеющей стали. При разработке аппаратной части интеллектуальной системы использованы методы теории цепей, методы измерений электрических величин. Результаты. Разработана структура интеллектуальной автоматизированной системы, которая позволяет осуществлять управляемый синтеза МДО-покрытий с заданными свойствами. Аппаратная часть системы содержит совокупность измерительных каналов, предназначенных для контроля и измерения свойств покрытий во время технологического процесса. Автоматизация достигается за счет разработанного интеллектуального приложения, объединяющего систему информационного наполнения и программного обеспечения. Выводы. Преимуществами предлагаемой интеллектуальной системы являются возможность осуществления измерений и контроля параметров оксидных покрытий в технологическом процессе во время нанесения покрытий; автоматизированный выбор технологических режимов. Данная система направлена на решение актуальной проблемы фундаментальной науки – установление взаимосвязей между технологическими параметрами процесса МДО и свойствами МДО-покрытий, способствует повышению управляемости технологии микродугового оксидирования, что способствует повышению качества и конкурентоспособности МДО-покрытий российского производства на мировом рынке.

A b s t r a c t. *Background*. Microarc oxidation (MAO) is a promising way to obtain durable oxide coatings by means of plasma-chemical processing of parts from valve metals and al-

© Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Г. В. Козлов, А. В. Печерский, 2019

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-08-00425.

loys. To date, this process has limited application due to the lack of a systemic description of the relationship between technological parameters and properties of coatings. The aim of the work is to develop an intelligent system that allows both to synthesize coatings with desired properties and to investigate the properties of coatings in order to establish the influence of heterogeneous factors on them. Materials and methods. MAO is a plasma-chemical method of hardening samples of valve metals with unipolar conductivity in the metal-oxide-electrolyte system, such as aluminum, magnesium or titanium. The coatings synthesized by this method are an oxide layer consisting of high-temperature crystalline modifications of alumina. To obtain oxide coatings, a galvanic cell is used - a bath with electrolyte in which two electrodes are immersed - an anode (a part made of a valve metal) and a cathode made of stainless steel. When developing the hardware of an intelligent system, methods of the theory of circuits, methods of measuring electrical quantities were used. Results. The structure of an intelligent automated system that allows controlled synthesis of MAO coatings with desired properties has been developed. The hardware part of the system contains a set of measuring channels designed to monitor and measure the properties of coatings during the process. Automation is achieved through a developed intelligent application that combines content management systems and software. Conclusions. The advantages of the proposed intelligent system are the ability to measure and control the parameters of oxide coatings in the process during the deposition of coatings; automated selection of technological regimes. This system is aimed at solving the urgent problem of fundamental science – establishing relationships between the technological parameters of the MAO process and the properties of MAO coatings, and contributes to improving the controllability of microarc oxidation technology, which contributes to the quality and competitiveness of MAO coatings produced in Russia on the world market.

К л ю ч е в ы е с л о в а: интеллектуальная система, микродуговое оксидирование, информационная поддержка, аппаратная часть, измерения параметров.

K e y w o r d s: intelligent system, microarc oxidation, information support, hardware, parameter measurements.

Введение

В настоящее время активно развивается микродуговое оксидирование (МДО) – направление плазмохимической обработки деталей из вентильных металлов и сплавов. Широко известны более 10 основных предприятий в мире, успешно выпускающих изделия с упрочняющими покрытиями, выполненные по данной технологии. Это Keronite в Великобритании, Plasma Technology Ltd. и GERE в Китае, Progress Industrial Systems SA в Швейцарии, ООО «Русский профиль», ЗАО «Манэл», ООО «Сибспарк», АО «НИИ СТТ», ООО «НПП Магнетик-Дон», ООО «НПЦ Титан» в России и др.

Длительное время учеными предпринималось большое количество попыток автоматизации процесса МДО [1–3], лишь в последнее время появляются работы, в которых для решения данной задачи применяются интеллектуальные алгоритмы, например, нейронные сети [4, 5]. Однако в данных работах не использовалась вся совокупность влияющих факторов и отсутствовала обратная связь между технологическими параметрами и свойствами МДО-покрытия.

В связи с этим авторами предложена интеллектуальная автоматизированная система управляемого синтеза (ИАСУС) МДО-покрытий, предназначенная для установления взаимосвязей между параметрами технологического процесса МДО и свойствами оксидных покрытий и реализующая управляемое получение этих покрытий с требуемыми свойствами на основе разработанных алгоритмов.

Фундаментальные основы процесса МДО

Подробные теоретические сведения о процессе МДО изложены в работах [6, 7], ниже рассмотрены те из них, которые необходимы для понимания принципов функционирования предлагаемой интеллектуальной системы. МДО является закономерным развитием техноло-

гии анодирования и представляет собой плазмохимический метод упрочнения образцов из вентильных металлов, обладающих униполярной проводимостью в системе «металл-оксидэлектролит» (МОЭ), таких как алюминий, магний или титан. МДО-покрытия, синтезируемые данным методом, представляют собой оксидный слой, состоящий из высокотемпературных кристаллических модификаций оксида алюминия, в основном корунда. Такое покрытие обладает повышенной микротвердостью (до 25 ГПа), износостойкостью, коррозионной стойкостью, электрической прочностью и жаростойкостью (выдерживает кратковременный тепловой удар до 1500 °C) [8], а также хорошей биосовместимостью [9]. Для получения МДО-покрытий используется гальваническая ячейка – ванна с электролитом, в которую погружены два электрода – анод (деталь из вентильного металла) и катод из нержавеющей стали. Самым популярным электролитом является силикатно-щелочной, состоящий из силиката натрия Na₂SiO₃ и гидроксида калия КОН). К аноду и катоду подключен источник технологического тока (ИТТ).

Покрытие формируется при высоковольтном импульсном воздействии на деталь, причем в положительном (анодном) и отрицательном (катодном) полупериоде происходят разные процессы. В анодном полупериоде наблюдается рост оксидной пленки, в катодном – ее частичное растворение и подготовка поверхности к последующему формированию нового слоя оксида.

Выделяют четыре стадии процесса МДО, четко прослеживающиеся на формовочной кривой (зависимости формовочного напряжения от времени обработки): стадия анодирования, искровых, микродуговых и дуговых разрядов. Стадия анодирования является самой непродолжительной (длится несколько секунд), тогда как общее время МДО-обработки варьируется от 30 мин до 2,5 ч. Стадия дуговых разрядов является нежелательной, поскольку приводит к разрушению покрытия. Основное полезное воздействие приходится на стадию микродуговых разрядов, в которой происходит фазовое превращение аморфных аллотропных модификаций оксида алюминия в высокотемпературные кристаллические.

На свойства МДО-покрытия влияет множество факторов, систематизированных в работах [10, 11]:

– технологические параметры: плотность тока, время обработки, соотношение анодного и катодного токов, частота импульсов ИТТ, формовочное напряжение;

- параметры заготовки: состав исходного сплава, шероховатость поверхности;

- параметры электролита: состав, температура, мутность и выработка.

В ходе серийного производства при длительном использовании одного и того же электролита происходит его выработка – обеднение ионами, которые становятся частью покрытия. В результате этого электролит теряет свои полезные свойства, что приводит к прогарам покрытия и браку изделия. В связи с этим необходим строгий контроль и периодическая корректировка состава электролита в процессе МДО.

При МДО-обработке в электролите также скапливается шлам, образующийся из частиц покрытия, выбитых микроразрядами, который при перемешивании придает электролиту нежелательную мутность и затрудняет измерение яркости микроразрядов.

Структура интеллектуальной системы

Интеллектуальная автоматизированная система управляемого синтеза МДО-покрытий состоит из трех основных частей: аппаратной части, программного (ПО) и информационного обеспечения (рис. 1).

Аппаратная часть представляет собой совокупность технических средств, необходимых для получения МДО-покрытий, измерения их свойств и параметров технологического процесса в режиме реального времени, а также для обработки результатов экспериментов. В данном случае это установка МДО и компьютер.

Программное обеспечение включает в себя: ПО для управления и настройки аппаратной части, интеллектуальное приложение управляемого синтеза (ИПУС) и ПО для поддержки исследований МДО-процесса (клиентское ПО). ПО для управления и настройки включает в себя программное обеспечение микроконтроллера, осуществляющего подачу сигналов управления установкой МДО и выполнение измерений, и серверное программное обеспечение, отвечающее за настройку системы. Интеллектуальное приложение УС объединяет программные алгоритмы, реализующие методики управляемого синтеза МДО-покрытий, разработанные авторами.



Рис. 1. Структура интеллектуальной автоматизированной системы управляемого синтеза МДО-покрытий

ПО для поддержки исследований МДО-процесса включает в себя программные средства, реализующие обработку результатов экспериментов, и отображение данных в виде, удобном для восприятия пользователей. В частности, интерфейс программы «Планирование эксперимента» целесообразно представить в виде ориентированного графа, отображающего взаимосвязи «технологический параметр – свойство МДО-покрытия – параметр качества». При этом предусмотрена возможность выбора свойств, которые необходимо контролировать согласно заданным требованиям в процессе МДО. Пример интерфейса в виде графа, включающего окно выбора свойств покрытий, представлен на рис. 2.



Рис. 2. Пример интерфейса в виде графа, включающего окно выбора свойств покрытий

Информационное обеспечение подразумевает наличие в системе банка знаний (рис. 3), содержащего следующие базы знаний (БЗ) и базы данных (БД):

– БЗ свойств МДО-покрытий;

 – БЗ теоретических методов исследования МДО-покрытий (физико-химические закономерности, эквивалентные электрические схемы и т.п.);

 – БЗ математических моделей взаимосвязи между технологическими параметрами, свойствами и параметрами качества МДО-покрытий;

– БЗ режимов МДО-процесса;

– БЗ методов измерения технологических параметров и свойств покрытий;

- БД средств измерения и их метрологических характеристик;
- Справочная БЗ о механизме МДО;

– Справочная БЗ «Применение МДО-покрытий» (включает примерные значения свойств МДО-покрытий для различных применений).



Рис. 3. Структура информационной поддержки интеллектуальной системы

Структура аппаратной части интеллектуальной системы

Аппаратная часть интеллектуальной системы МДО-покрытий включает в себя источник технологического тока (ИТТ), измерительную схему (ИС), микропроцессорный модуль (МПМ), гальваническую ячейку (ГЯ), систему охлаждения и перемешивания электролита и блок питания (БП) низковольтных схем (рис. 4).

Источник технологического тока представляет собой высоковольтный (600 В) транзисторный источник тока, построенный по мостовой схеме и работающий по принципу широтно-импульсной модуляции. На его выходе формируется импульсный сигнал технологического тока (воздействие) с переменной полярностью (анодные импульсы, катодные импульсы, анодно-катодные импульсы) и формой (синусоидальная, прямоугольная, треугольная, трапецеидальная), которая прикладывается к образцу в гальванической ячейке.

Измерительная схема представляет собой совокупность измерительных преобразователей, позволяющих в режиме реального времени измерять технологические параметры процесса МДО (ток, напряжение, яркость микроразрядов, температура, мутность и выработка электролита) и свойства растущего МДО-покрытия (толщину) [12–16]. Измерительные преобразователи выполняют двойную функцию: во-первых, с их помощью осуществляется сбор экспериментальных данных, а также пополнение базы знаний; во-вторых, измерительные преобразователи являются элементом обратной связи между источником технологического тока и интеллектуальным приложением. Это позволит установить взаимосвязи параметров технологического процесса и свойств МДО-покрытий и дает возможность осуществить управляемый синтез высококачественных оксидных слоев.

Микропроцессорный модуль предназначен для формирования управляющих сигналов для источника технологического тока и измерительных преобразователей. В микропроцессорный модуль входит микроконтроллер, имеющий в составе аналого-цифровой (АЦП) и цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), 8-канальный мультиплексор и порт UART; цифровой

синтезатор сигналов, преобразователь интерфейсов USB – UART на базе микросхемы FT232RL и узел гальванической развязки. Посредством гальванической развязки USB-порта организована связь с ПК, отвечающая требованиям техники безопасности.



Рис. 4. Структура аппаратной части интеллектуальной системы

ГЯ представляет собой емкость из нержавеющей стали, заполненную электролитом, в который погружены два электрода – анод и катод, а также датчики температуры и выработки электролита и толщины МДО-покрытия. В крышку ГЯ вмонтирован датчик яркости микроразрядов, представляющий собой ИК фотодиод. Датчик мутности электролита вынесен в отдельную кювету, расположенную на трубе проточной системы охлаждения.

Питание ИАСУС осуществляется от сети 220 В, причем для низковольтной аппаратуры (измерительной схемы, микропроцессорного модуля, вентиляторов и т.п.) выделен отдельный блок питания БП. Также в системе предусмотрено защитное ограждение в виде концевого выключателя, которое срабатывает при открывании ГЯ.

Заключение

Предлагаемая интеллектуальная автоматизированная система управляемого синтеза позволяет решить актуальную и значимую проблему фундаментальной науки, связанную с установлением взаимосвязей между технологическими параметрами процесса МДО и свойствами МДО-покрытий, а также способствует повышению управляемости технологии микродугового оксидирования, что способствует повышению качества и конкурентоспособности МДО-покрытий российского производства на мировом рынке.

Библиографический список

- 1. *Borikov, V. N.* Virtual measurement system of electric parameters of microplasma processes / V. N. Borikov, P. F. Baranov, A. D. Bezshlyakh // Proc. SIBCON. 2009. P. 275–279.
- Borikov, V. N. Measurement system for coating quality control during high-current process in electrolyte solution / V. N. Borikov // Proc. ISMQC. – 2007. – P. 287–291.
- 3. *Bolshenko, A. V.* Power Supplies for Microarc Oxidation Devices / A. V. Bolshenko, A. V. Pavlenko, V. S. Puzin, I. N. Panenko // Life Sci. J. 2014. Vol. 11(1s). P. 263–268.
- Bol'shenko, A. V. Current Controllers for Devices of Microplasma Oxidation / A. V. Bol'shenko, A. V. Pavlenko, V. P. Grinchenkov, V. S. Puzin // Russian Electrical Eng. - 2012. - Vol. 83, № 5. - P. 260-265.
- Borikov, V. Neural method alloys identification by the microplasma oxidation process in the electrolyte solutions / V. Borikov // Materialwissenschaft und werkstofftechnik – Materialwiss Werkstofftech. – 2006. – Vol. 37. – P. 915–918. – DOI 10.1002/mawe.200600077.
- Реализация поддержки принятия решений в управлении процессом микродугового оксидирования на базе искусственных нейронных сетей / В. В. Ломакин, Т. В. Зайцева, Н. П. Путивцева, В. М. Яценко, О. П. Пусная // Научные ведомости. Сер.: Экономика. Информатика. – 2016. – Вып. 40, № 23 (244). – С. 124–133.
- Darband, B. Plasma electrolytic oxidation of magnesium and its alloys: Mechanism, properties and applications / B. Darband, M. Aliofkhazraei, P. Hamghalam, N. Valizade // J. of Magnesium and Alloys. – 2017. – Vol. 5. – P. 74–132.
- 8. *Казанцев, И. А.* Коррозионная стойкость композиционных материалов на основе алюминия и его сплавов, формируемых микродуговым оксидированием / И. А. Казанцев, А. Е. Розен, А. О. Кривенков, С. Н. Чугунов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2007. № 3. С. 138–142.
- 9. Preparation of high emissivity and low absorbance thermal control coatings on Ti alloys by plasma electrolytic oxidation / Zh. Yao, Q. Shen, A. Niu, B. Hu, Zh. Jiang // Surf. & Coat. Technol. 2014. Vol. 242. P. 146–151. DOI 10.1016/j.surfcoat.2014.01.034.
- Chung, C. J. Plasma electrolytic oxidation of titanium and improvement in osseointegration / C. J. Chung // J. Biomed. Mater. Res. Part B. – 2013. – Vol. 101. – P. 1023–1030.
- Golubkov, P. E. Methods of applying the reliability theory for the analysis of micro-arc oxidation process / P. E. Golubkov, E. A. Pecherskaya, O. V. Karpanin, Y. V. Shepeleva // IOP Conf. Series: J. of Phys.: Conf. Series. – 2018. – Vol. 1124. – P. 081014. – DOI 10.1088/1742-6596/1124/8/081014.
- Automation of the micro arc oxidation process / P. E. Golubkov, E. A., Pecherskaya, O. V. Karpanin, Y. V. Shepeleva, T. O. Zinchenko, D. V. Artamonov // Journal of Physics: Conf. Series. – 2017. – № 917. – P. 092021. – DOI 10.1088/1742-6596/917/9/092021.
- Автоматизированная исследовательская технологическая установка микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, Е. А. Печерская, О. В. Карпанин, Ю. В. Шепелева, Т. О. Зинченко, Д. В. Артамонов // Наноструктурированные оксидные пленки и покрытия : сб. ст. по материалам IV Междунар. молод. науч. школы-семинара. – Петрозаводск, 2017. – С. 103–114.
- 14. Голубков, П. Е. Методы измерения температуры в процессе микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, А. В. Мартынов, Е. А. Печерская // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. V Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. / под ред. Л. Р. Фионовой. Пенза, 2018. С. 245–248.
- 15. Голубков, П. Е. Применение инструментов контроля качества для анализа процесса микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, Е. А. Печерская, А. В. Мартынов // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : тез. докл. III Всерос. молодежной науч. конф. – Тамбов, 2018. – С. 111–113.
- 16. Голубков, П. Е. Методы измерения выработки электролита в процессе микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, Е. А. Печерская // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : материалы Междунар. науч.техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения В. М. Шляндина. – Пенза, 2018. – С. 121–124.

References

- 1. Borikov V. N., Baranov P. F., Bezshlyakh A. D. Proc. SIBCON. 2009, pp. 275–279.
- 2. Borikov V. N. Proc. ISMQC. 2007, pp. 287-291.
- Bolshenko A. V., Pavlenko A. V., Puzin V. S., Panenko I. N. Life Sci. J. 2014, vol. 11(1s), pp. 263–268.

- Bol'shenko A. V., Pavlenko A. V., Grinchenkov V. P., Puzin V. S. Russian Electrical Eng. 2012, vol. 83, no. 5, pp. 260–265.
- Borikov V. Materialwissenschaft und werkstofftechnik Materialwiss Werkstofftech [Material science and engineering technology Materialwiss Werkstofftech]. 2006, vol. 37, pp. 915–918. DOI 10.1002/mawe.200600077.
- Lomakin V. V., Zaytseva T. V., Putivtseva N. P., Yatsenko V. M., Pusnaya O. P. *Nauchnye vedomosti. Ser.: Ekonomika. Informatika* [Scientific statements. Ser.: Economy. Informatics]. 2016, iss. 40, no. 23 (244), pp. 124–133. [In Russian]
- 7. Darband B., Aliofkhazraei M., Hamghalam P., Valizade N. J. of Magnesium and Alloys. 2017, vol. 5, pp. 74–132.
- 8. Kazantsev I. A., Rozen A. E., Krivenkov A. O., Chugunov S. N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2007, no. 3, pp. 138–142. [In Russian]
- Yao Zh., Shen Q., Niu A., Hu B., Jiang Zh. Surf. & Coat. Technol. 2014, vol. 242, pp. 146– 151. DOI 10.1016/j.surfcoat.2014.01.034.
- 10. Chung C. J. J. Biomed. Mater. Res. Part B. 2013, vol. 101, pp. 1023–1030.
- Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Karpanin O. V., Shepeleva Y. V. *IOP Conf. Series:* J. of Phys.: Conf. Series. 2018, vol. 1124, pp. 081014. DOI 10.1088/1742-6596/1124/8/081014.
- Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Karpanin O. V., Shepeleva Y. V., Zinchenko T. O., Artamonov D. V. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2017, no. 917, pp. 092021. DOI 10.1088/1742-6596/917/9/092021.
- Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Karpanin O. V., Shepeleva Yu. V., Zinchenko T. O., Artamonov D. V. Nanostrukturirovannye oksidnye plenki i pokrytiya: sb. st. po materialam IV Mezhdunar. molod. nauch. shkoly-seminara [Nanostructured oxide films and coatings : collection of articles on the materials of the IV International youth science. schoolseminar's]. Petrozavodsk, 2017, pp. 103–114. [In Russian]
- Golubkov P. E., Martynov A. V., Pecherskaya E. A. Informatsionnye tekhnologii v nauke i ob-razovanii. Problemy i perspektivy: sb. nauch. st. V Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. [Information technologies in science and education. Problems and prospects : collection of scientific articles V all-Russian interuniversity scientific.-prakt. conf.]. Penza, 2018, pp. 245–248. [In Russian]
- 15. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Martynov A. V. *Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya: tez. dokl. III Vseros. molodezhnoy nauch. konf.* [Radionics. Problems and prospects of development : abstracts of the III all-Russian youth scientific conf.]. Tambov, 2018, pp. 111–113. [In Russian]
- 16. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A. Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 100-letiyu so dnya rozhdeniya V. M. Shlyandina [Methods, means and technologies of obtaining and processing of measuring information : materials of International scientific research.-tech. conf., devoted the 100th anniversary of the birth of V. M. Shlyandina]. Penza, 2018, pp. 121–124. [In Russian]

Печерская Екатерина Анатольевна

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационноизмерительной техники и метрологии, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: pea1@list.ru

Голубков Павел Евгеньевич

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

Pecherskaya Ekaterina Anatolevna

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

Golubkov Pavel Evgenevich

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

$2019, N^{0} 2 (28)$

Карпанин Олег Валентинович

старший преподаватель, кафедра нано- и микроэлектроники, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: karpanino@mail.ru

Козлов Геннадий Васильевич

доктор технических наук, профессор, директор Политехнического института, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: gvk17@yandex.ru

Печерский Анатолий Вадимович

доктор технических наук, профессор, кафедра информационного обеспечения управления и производства, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: ura258@yandex.ru

Karpanin Oleg Valentinovich

senior lecturer, sub-department of nano-and microelectronics, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Kozlov Gennadiy Vasilevich

doctor of technical sciences, professor, director of Polytechnic Institute, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Pecherskiy Anatoliy Vadimovich

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

Образец цитирования:

Интеллектуальная система управляемого синтеза оксидных покрытий / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Г. В. Козлов, А. В. Печерский // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 99–107. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-12.