

Расчет и конструирование машин

УДК 620.165:29.620.79.1

DOI 10.18698/0536-1044-2017-11-3-9

Моделирование процессов течеискания

В.А. Макаров¹, А.В. Макаров¹, Ф.А. Королев²¹ Московский технологический университет, 119454, Москва, Российская Федерация, пр-т Вернадского, д. 78² ГНЦ РФ «ГНИИХТЭОС», 105118, Москва, Российская Федерация, шоссе Энтузиастов, д. 38

Modelling the Processes of Leak Detection

V.A. Makarov¹, A.V. Makarov¹, F.A. Korolev²¹ Moscow Technological University, 119454, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave., Bldg. 78² State Research Institute for Chemistry and Organoelement Compounds GNIKhTEOS, 105118, Moscow, shosse Entuziastov, Bldg. 38

e-mail: himtest@mail.ru



Представлены две концепции формализованного описания процесса истечения газов через дефекты изделий при контроле герметичности: модель внутреннего описания на основе использования параметров теории цепей и математическая модель внешнего описания с применением функциональных разложений, полученная на базе результатов экспериментальных исследований. Вторая модель реализована с помощью программного обеспечения, состоящего из базовой программы управления, осуществляющей связь между объектом исследования, формированием тестирующих сигналов и обработкой выходных функций, и пакета базовых программ идентификации и математического моделирования системы, обеспечивающей вычисление ядер Винера по входным данным, получаемым в результате проведения эксперимента, и проверку степени соответствия созданной модели в пространстве состояний. Приведена динамическая модель истечения газов через дефекты изделий на основе уравнений Винера–Вольтерра. Предлагаемый метод изучения истечения газов через дефекты изделий заключается в формализованном представлении объекта моделирования, на вход которого подается внешнее воздействие при остальных постоянно варьируемых параметрах. В качестве внешнего воздействия использован тестирующий сигнал в виде белого гауссовского шума, содержащего составляющие любой частоты и амплитуды при нормальном распределении. Проведено сравнение результатов эксперимента и теоретического расчета на основе молекулярной модели процесса истечения газов.

Ключевые слова: степень герметичности, процесс течеискания, процесс истечения газов, метод линейных цепей, модель Винера–Вольтерра



The article presents two concepts of a formalized description of the outflow of gases due to manufacturing defects during tightness control: a model of internal description based on parameters of the circuit theory; and a mathematical model of external description that uses functional expansions obtained through experimental research. The latter model is realized using the software that includes a basic management program that connects the object of the research with formation of the test signals and processing of the output functions. It also incorporates a basic software package for identification and mathematical modeling of a system for calculating Wiener kernels using input data obtained through the experiment, and for verifying the degree of conformity of the resulting model in the state space.

A dynamic model of the outflow of gases through flaws in products is presented using the Wiener-Volterra equations. The proposed method of studying the outflow of gases consists of a formalized representation of a simulation object whose input point is subjected to an external action, while other parameters vary constantly. A test signal in the form of white Gaussian noise, containing components of any frequency and amplitude following a normal distribution is used as an external action. The experimental data are compared with the results of theoretical calculations based on the molecular model of the outflow process.

Keywords: degree of leak resistance, leak detection process, gas outflow process, linear circuits method, Wiener-Volterra model

Процесс истечения газов через дефекты изделий можно описать уравнениями Винера-Вольтерра [1], на основе которых построена математическая модель [2] с заданной степенью точности.

Цель работы — разработка динамической модели на базе экспериментальных данных в диапазоне потока газов $10^{-7} \dots 10^1$ (Па·м³)/с и сравнение полученных результатов по выбранному критерию адекватности с теоретическими, рассчитанными с использованием методов линейных цепей [3, 4].

Предлагаемый метод изучения истечения газов через дефекты изделий заключается в формализованном представлении объекта моделирования, на вход которого подается внешнее воздействие $X(t)$ при постоянных остальных варьируемых параметрах и регистрируется выходной сигнал $Y(t)$ (рис. 1). При этом внутренние процессы в системе не рассматриваются.

Внешнее воздействие $X(t)$ представляет собой тестирующий сигнал в виде белого гауссовского шума, содержащего составляющие любой частоты и амплитуды при нормальном распределении. Преимущество использования такого теста заключается в возможности получения максимума информации в минимальные сроки [5].

Согласно работе [6], выходной сигнал $\hat{y}_j(t)$ относительно j -го входа можно разложить в ряд по многомерным ортогональным функционалам:

$$\hat{y}_j(t) = \sum_{n=0}^{\infty} G_n [\{h\}_j, X(t)],$$

где G_n — набор ортогональных многомерных функционалов; $\{h\}_j$ — система ядер Винера, включающая в себя наборы ядер относительно j -го выхода.

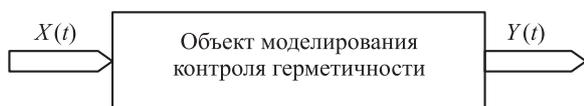


Рис. 1. Математическая модель описания системы

Ортогональный функционал G_n (n -й степени)

$$\begin{aligned} G_n [\{h\}_j, X(t)] = & \int_{t_0}^t \dots \int_{t_0}^t \sum_{i_1 \dots i_n=1}^r h_n^{(i_1 \dots i_n)}(t; \tau_1 \dots \tau_n) x_{i_1}(\tau_1) \dots \times \\ & \times x_{i_n}(\tau_n) d\tau_1 \dots d\tau_n + \\ & + \int_{t_0}^t \dots \int_{t_0}^t \sum_{i_1 \dots i_{n-1}=1}^r h_{n-1}^{(i_1 \dots i_{n-1})}(t; \tau_1 \dots \tau_{n-1}) x_{i_1}(\tau_1) \dots \times \\ & \times x_{i_{n-1}}(\tau_{n-1}) d\tau_1 \dots d\tau_{n-1} + \dots + \\ & + \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^r \hat{h}_{1n}^i(t; \tau) d\tau + \sum_{i=1}^n \hat{h}_{0n}^{(i)}(t). \end{aligned}$$

Здесь t — непрерывный сигнал по времени; τ_1, \dots, τ_n — дискретные входные сигналы по времени; $\hat{h}_{1n}^i(t; \tau)$ и $\hat{h}_{0n}^{(i)}(t)$ — ортогональные ядра первого и нулевого порядка относительно n -го выхода,

$$\begin{aligned} \hat{h}_{1n}^i(t; \tau) = & -\frac{1}{N_i} M [|\Phi_n(t) x_i(\tau)|], \\ \sum_{i=1}^r \hat{h}_{0n}^{(i)}(t) = & -M [|\Phi_n(t)|], \end{aligned}$$

где M — линейный размер корректируемой области $(M+n-1)/n$; $\Phi_n(t)$ — однородный функционал n -й степени.

Приведенное ортогональное разложение удобно тем, что его улучшение путем выбора большего числа n не изменяет предыдущих G_n , а только добавляет новые.

Применение функциональных разложений позволяет представить исследуемый процесс в виде модели (рис. 2), состоящей из объединения нелинейных преобразователей, в которых необходимо определить наборы ядер, а по ним — соответствующие ортогональные функционалы G_n .

Для исследуемого процесса, учитывая изменение режимов течения газов от молекулярного до вязкостного [7], описываемых соответственно линейными и квадратичными уравнениями,

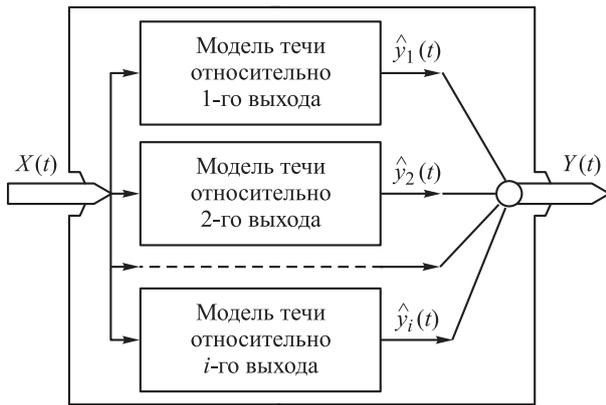


Рис. 2. Определение входных-выходных характеристик модели

достаточно использовать ортогональные функционалы нулевой, первой и второй степени, имеющие следующий вид:

$$G_0[\{h\}, X(t)] = h_0(t) = \sum_{i=1}^2 h_0^{(i)}(t);$$

$$G_1[\{h\}, X(t)] = \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^2 h_1^{(i)}(t; \tau) x_{i1}(\tau) d\tau;$$

$$G_2[\{h\}, X(t)] =$$

$$= \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t \sum_{i_1, i_2=1}^2 h_2^{(i_1 i_2)}(t; \tau_1 \tau_2) x_{i_1}(\tau_1) x_{i_2}(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 -$$

$$- \int_{t_0}^t \sum_{i_1=1}^2 N_{i_2} h_2^{(i_1 i_2)}(t; \tau_1 \tau_2) d\tau_2,$$

где N_{i_2} — количество ядер второго порядка [8].

Ядро нулевого порядка равно математическому ожиданию выходного сигнала

$$h_0(t) = \sum_{i=1}^2 h_0^{(i)}(t) = M[\|y(t)\|].$$

Ядро первого порядка

$$h_1^i(t; \alpha) = \frac{1}{N_i} M[\|y(t)x_i(\alpha)\|], \quad i = 1, 2,$$

где $1/N_i$ — количество ядер первого порядка.

Наборы ядер второго порядка $\{h_2^{(i_1 i_2)}\}$, $\{h_{02}^{(i)}\}$ и $\{h_{12}^{(i)}\}$ определяются тремя соотношениями:

$$h_2^{(j_1 j_2)}(t; \alpha_1, \alpha_2) = \frac{1}{2N_{j_1}N_{j_2}} M[\|y_2(t)x_{j_1}(\alpha_1)x_{j_2}(\alpha_2)\|];$$

$$\sum_{j=1}^2 h_{02}^{(j)}(t) = -M[\|\Phi_2(t)\|];$$

$$h_{12}^{(j)}(t; \alpha) = -\frac{1}{N_j} M[\|\Phi_2(t)x_j(\alpha)\|],$$

где $h_{02}^{(j)}(t)$ и $h_{12}^{(j)}(t; \alpha)$ — ортогональные ядра нулевого и первого порядка; $\alpha, \alpha_1, \alpha_2$ — взаимозависимые параметры; $\Phi_2(t)$ — однородный функционал второй степени,

$$\Phi_2(t) =$$

$$= \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t \sum_{j_1, j_2=1}^2 h_2^{(\alpha_1, \alpha_2)}(t; \alpha_1, \alpha_2) x_{j_1}(\alpha_1) x_{j_2}(\alpha_2) d\alpha_1 d\alpha_2.$$

В результате применения такого метода построение модели сводится к реализации однородных функционалов до второй степени, в каждый из которых входит сумма ядер одного порядка (рис. 3).

В качестве входного воздействия использован тестирующий сигнал давления испытания p в виде белого гауссовского шума [9].

Исследование моделей проведено на установке, в состав которой входили следующие блоки (рис. 4): система тестирующих воздействий испытательным давлением в пределах 0,02...0,2 МПа; объект исследования, представляющий собой макет изделия с нормированными течами, размещенный в термостатированной испытательной камере (радиус нормированных течей изменялся в интервале $5 \cdot 10^{-8} \dots 11 \cdot 10^{-4}$ м); чувствительные элементы (ЧЭ) с усилителем их сигнала, например, газоаналитические датчики контроля герметичности — электронно-захватный [10], пневмогальванометрический [11] и струйно-пневматический [12] с соответствующими диапазонами измерения потока газов $10^{-10} \dots 10^{-7}$, $10^{-7} \dots 10^{-3}$ и

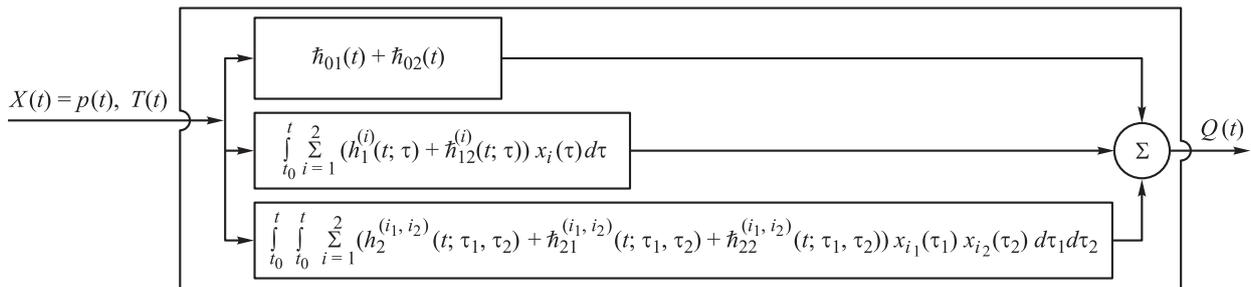


Рис. 3. Динамическая модель процесса истечения газов с одномерными функционалами второй степени

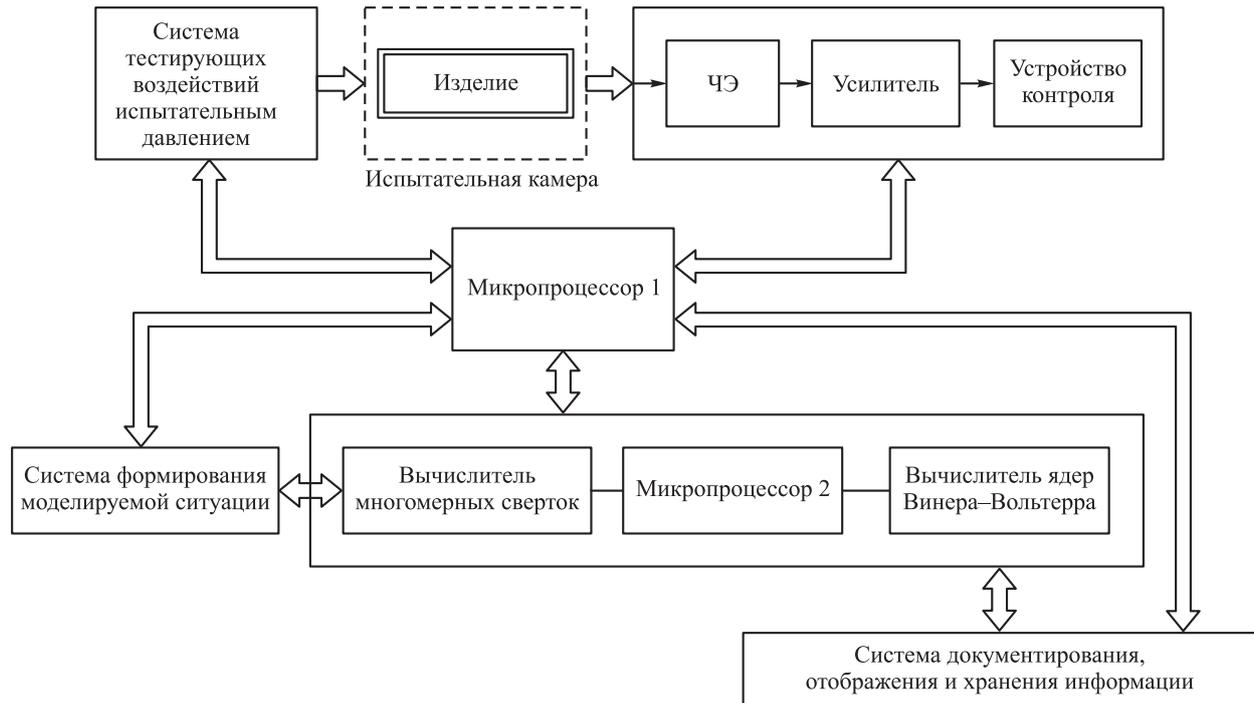


Рис. 4. Блок-схема автоматизированной системы проведения экспериментальных исследований

$10^{-3} \dots 10^1$ (Па·м³)/с; устройство контроля, на которое поступают сигналы через усилитель; микропроцессор 1 для управления автоматизированной установкой; система формирования моделируемой ситуации; микропроцессор 2 для вычисления многомерных сверток и ядер Винера-Вольтерра; система документирования отображения и хранения информации.

Для определения параметров процесса истечения газов применены две концепции формализованного описания: расчетная модель внутреннего описания на основе теории цепей и математическая модель внешнего описания с

применением функциональных разложений, полученная на базе результатов экспериментальных исследований (рис. 5). При изучении процесса истечения газов использованы следующие входные характеристики: изменение давления Δp , испытательное давление p и время контроля T . Выходными характеристиками, получаемыми после процесса истечения газов, являлись молекулярный расход Q , степень герметичности B и допустимый поток Π .

Математическая модель внешнего описания реализована с помощью программного обеспе-



Рис. 5. Методика изучения процесса истечения газов по совместному внешнему и внутреннему описанию

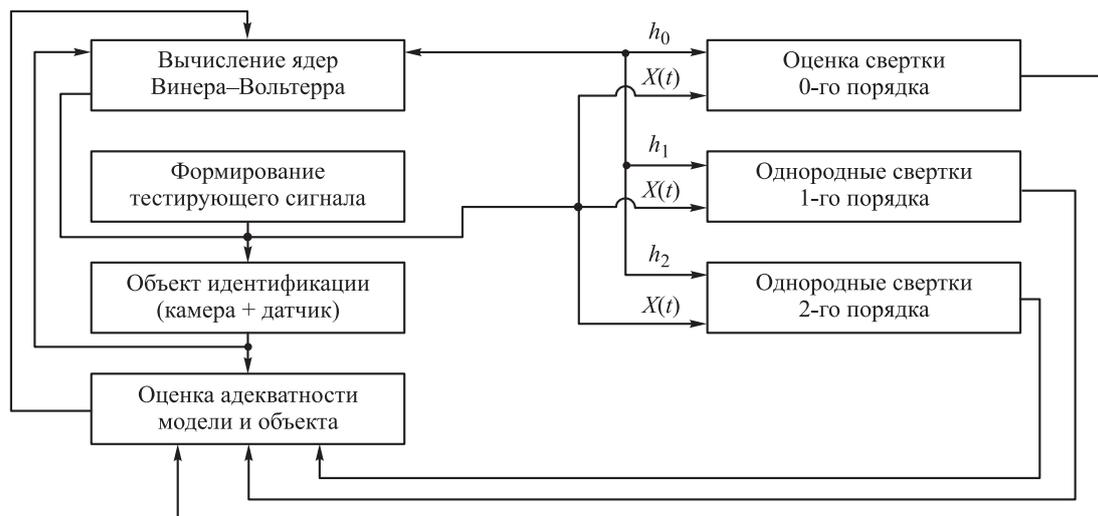


Рис. 6. Схема проведения эксперимента по идентификации процесса истечения газов

чения, состоящего [13] из базовой программы управления, осуществляющей связь между объектом исследования, формированием тестирующих сигналов и обработкой выходных функций, и пакета базовых программ идентификации и математического моделирования системы, обеспечивающей вычисление ядер Винера по входным данным, получаемым в результате проведения эксперимента, и проверку степени соответствия созданной модели расчетной в пространстве состояний. В этот пакет входит программа тестирующих воздействий с заданными статистическими характеристиками [14].

Эксперимент по идентификации процесса истечения газов проведен по схеме, представленной на рис. 6.

На его первом этапе выполнен расчет ядра Винера, на втором — оценка адекватности модели и объекта [15] путем минимизации среднеквадратического отклонения реального выхода $y(t)$ от выхода модели $\hat{y}(t)$:

$$\text{СКО}_{\min} = M[|y(t) - \hat{y}(t)|].$$

В результате эксперимента определены значения молекулярного расхода Q . Сравнение полученных Q и расчетных Q_p данных показало, что относительная погрешность в среднем не превышает 20 %.

Выводы

1. Проведено изучение нестационарных процессов истечения газов через дефекты изделий с помощью методов математического моделирования.

2. Выполнено экспериментальное исследование реальных процессов истечения газов с применением автоматизированной системы с математическим обеспечением, в основе которого лежат функциональные разложения Винера-Вольтерра. В качестве тестирующего сигнала использован белый гауссовский шум, задача формирования которого решалась в автоматизированной системе.

3. Приведены точностные характеристики идентификации результатов эксперимента и теоретической модели.

Литература

- [1] Музыкин С.Н., Родионова Ю.М. *Системный анализ*. Москва, МГАПИ, 2003. 199 с.
- [2] Козлова Н.С., Шестернева О.В. О задаче определения типа нелинейности в моделях Винера. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики-2014. Информационные технологии*. Сб. тр., Красноярск, 8–12 апреля 2014 г., Красноярск, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнёва, 2014, с. 291–292.
- [3] Макаров В.А., Тютяев Р.Е., Асадова Ю.С. Определение параметров течения газов в дефектах изделий методом электрогидравлической аналогии. *Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении*. Сб. тр. конф., Москва, 24–25 ноября 2015 г., Москва, Изд. дом Спектр, 2015, с. 151–155.

- [4] Макаров В.А., Асадова Ю.С., Тютяев Р.Е. Анализ нестационарных процессов истечения газов через дефекты изделий. *Матер. 9-й Всерос. науч.-практ. конф. Технический сервис и информационные технологии*, Ростов-на-Дону, 11–15 мая 2015 г., Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2015, с. 73–88.
- [5] Дунюшкин Д.Ю. Метод формирования тестовых сигналов для корреляционной идентификации нелинейных систем. *Компьютерные исследования и моделирование*, 2012, т. 4, № 4, с. 721–733.
- [6] Ефимов И.Н., Морозов Е.А., Селиванов К.М. *Компьютерное моделирование динамических систем*. Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2014. 134 с.
- [7] Макаров В.А. Герметологический анализ и синтез. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1990, № 2, с. 53–60.
- [8] Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. *Моделирование систем. Динамические и гибридные системы*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2012. 224 с.
- [9] Шеннон К. *Работы по теории информации и кибернетике*. Москва, Иностранная литература, 1963. 832 с.
- [10] Фарзани Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю. *Технологические измерения и приборы*. Москва, Высшая школа, 1989. 456 с.
- [11] Макаров В.А., Панфилов А.В. Использование силового действия струи при построении течеискательной аппаратуры. *Неразрушающие физические методы и средства контроля. Сб. тез. докл. 11-й Всесоюз. науч.-техн. конф.*, Москва, ЛДНТП, 1987, с. 59–60.
- [12] Залманзон Л.А., Лимонова М.Е., Макаров В.А., Таль А.А. *Струйно-механическое вычислительное устройство*. А.с. 474813 СССР, МКИ С00 5/00. 1971.
- [13] Бенькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сенченков Ю.Б. *Практическое моделирование динамических систем*. Санкт-Петербург, БХВ, 2002. 420 с.
- [14] Музыкин С.Н., Родионова Ю.М. *Функциональные разложения Винера–Вольтерра в задачах проектирования*. Ярославль, Верхне-Волжское книжное изд-во, 1992. 218 с.
- [15] Крылова Г.Д. *Основы стандартизации, сертификации и метрологии*. Москва, Юнити-Дана, 1999. 711 с.

References

- [1] Muzykin S.N., Rodionova Iu.M. *Sistemnyi analiz* [System analysis]. Moscow, MGAPI publ., 2003. 199 p.
- [2] Kozlova N.S., Shesterneva O.V. O zadache opredeleniia tipa nelineinosti v modeliakh Vinera [On the problem of identifying the type of nonlinearity in the Wiener model]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki-2014: Informatsionnye tekhnologii. Sb. tr.* [Actual problems of aviation and cosmonautics-2014, Information technology. Proceedings]. Krasnoyarsk, 8–12 April 2014, Krasnoyarsk, SibSAU publ., 2014, pp. 291–292.
- [3] Makarov V.A., Tiutiaev R.E., Asadova Iu.S. Opredelenie parametrov techeniia gazov v defektakh izdelii metodom elektrogidravlicheskoii analogii [Determination of the parameters of the flow of gases in defects products using electro-hydraulic analogy]. *Fundamental'nye issledovaniia i innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii. Sb. tr. konf.* [Fundamental research and innovative engineering technologies. The conference proceedings]. Moscow, 24–25 November 2015, Moscow, Spektr publ., 2015, pp. 151–155.
- [4] Makarov V.A., Asadova Iu.S., Tiutiaev R.E. Analiz nestatsionarnykh protsessov istecheniia gazov cherez defekty izdelii [Analysis of unsteady processes of flow of gases through the defects of the products]. *Tekhnicheskii servis i informatsionnye tekhnologii. Mater. 9 Vseross. nauch.-prakt. konf.* [Technical service and information technologies. Proceedings of 9 All-Russian scientific-practical conference]. Rostov-on-Don, 11–15 May 2015, Rostov-on-Don, DSTU publ., 2015, pp. 73–88.
- [5] Duniushkin D.Iu. Metod formirovaniia testovykh signalov dlia korreliatsionnoi identifikatsii nelineinykh sistem [A method of forming test signals for correlation and identification of nonlinear systems]. *Komp'iuternye issledovaniia i modelirovanie* [Computer research and modeling]. 2012, vol. 4, no. 4, pp. 721–733.
- [6] Efimov I.N., Morozov E.A., Selivanov K.M. *Komp'iuternoe modelirovanie dinamicheskikh sistem* [Computer simulation of dynamic systems]. Izhevsk, Institut komp'iuternykh issledovaniy publ., 2014. 134 p.

- [7] Makarov V.A. Germetologicheskii analiz i sintez [Gematologicheskyy analysis and synthesis]. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushaiushchii kontrol'* [Technical diagnostics and non-destructive testing]. 1990, no. 2, pp. 53–60.
- [8] Kolesov Iu.B., Senichenkov Iu.B. *Modelirovanie sistem. Dinamicheskie i gibridnye sistemy* [Modeling of systems. Dynamic and hybrid systems]. Sankt-Petersburg, BKhV-Peterburg publ., 2012. 224 p.
- [9] Shannon K. *Raboty po teorii informatsii i kibernetike* [Work on the theory of information and cybernetics]. Moscow, Inostrannaia literature publ., 1963. 832 p.
- [10] Farzane N.G., Iliasov L.V., Azim-zade A.Iu. *Tekhnologicheskie izmereniia i pribory* [Technological measurements and devices]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1989. 456 p.
- [11] Makarov V.A., Panfilov A.V. Ispol'zovanie silovogo deistviia strui pri postroenii techeiskatel'noi apparatury [The use of force of the jet when you build technically equipment]. *Nerazrushaiushchie fizicheskie metody i sredstva kontrolya. Sb. tez. dokl. 11-i Vses. nauchn. tekhn. konf.* [Non-destructive physical methods and means of verification. The book of abstracts 11th All-Union scientific-technical conference]. Moscow, LDNTP publ., 1987, pp. 59–60.
- [12] Zalmanzon L.A., Limonova M.E., Makarov V.A., Tal' A.A. *Struino-mekhanicheskoe vychislitel'noe ustroistvo* [Jet-mechanical computing device]. Copyright certificate USSR no. 474813, MKI S00 5/00, 1971.
- [13] Ben'kovich E.S., Kolesov Iu.B., Senchenkov Iu.B. *Prakticheskoe modelirovanie dinamicheskikh sistem* [Practical modeling of dynamic systems]. Sankt-Peterburg, BKhV publ., 2002. 420 p.
- [14] Muzykin S.N., Rodionova Iu.M. *Funktsional'nye razlozheniia Vinera–Vol'terra v zadachakh proektirovaniia* [Functional decomposition of the Wiener–Volterra the task of designing]. Yaroslavl, Verkhne-Volzhsкое knizhnoe publ., 1992. 218 p.
- [15] Krylova G.D. *Osnovy standartizatsii, sertifikatsii i metrologii* [Fundamentals of standardization, certification and metrology]. Moscow, Iuniti-Dana publ., 1999. 711 p.

Статья поступила в редакцию 10.07.2017

Информация об авторах

МАКАРОВ Валерий Анатольевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная информатика». Московский технологический университет (119454, Москва, Российская Федерация, пр-т Вернадского, д. 78, e-mail: himtest@mail.ru).

МАКАРОВ Андрей Валерьевич (Москва) — аспирант кафедры «Промышленная информатика». Московский технологический университет (119454, Москва, Российская Федерация, пр-т Вернадского, д. 78, e-mail: himtest@mail.ru).

КОРОЛЕВ Филипп Андреевич (Москва) — инженер ГНЦ РФ «ГНИИХТЭОС» (105118, Москва, Российская Федерация, шоссе Энтузиастов, д. 38, e-mail: himtest@mail.ru).

Information about the authors

MAKAROV Valeriy Anatolievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Industrial Informatics. Moscow Technological University (119454, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave., Bldg. 78, e-mail: himtest@mail.ru).

MAKAROV Andrey Valerievich (Moscow) — Postgraduate, Department of Industrial Informatics. Moscow Technological University (119454, Moscow, Russian Federation, Vernadskiy Ave., Bldg. 78, e-mail: himtest@mail.ru).

KOROLEV Filipp Andreevich (Moscow) — Engineer. State Research Center of the Russian Federation — State Research Institute for Chemistry and Organoelement Compounds GNIKhTEOS (105118, Moscow, Russian Federation, shosse Entuziastov, Bldg. 38, e-mail: himtest@mail.ru).