

DOI: 10.15593/2224-9400/2018.1.02

УДК 519.651

М.А. Работников, А.С. Александрова, А.Г. ШумихинПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
КОМПЛЕКСНОЙ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ УПРАВЛЯЕМОГО ОБЪЕКТА**

Одним из способов исследования динамики технологических объектов является идентификация каналов объекта, заключающаяся в определении их структуры и параметров по наблюдаемым данным – входному воздействию и выходным величинам объекта, с использованием частотных методов. В результате исследования определен набор экспериментальных данных, содержащий значения комплексной частотной характеристики для определенного набора частот. В данной работе представлены результаты разработки и тестирования программного приложения, предназначенного для обработки подобных измерений.

Приложение позволяет производить идентификацию передаточной функции канала передачи исследуемого объекта по комплексной частотной характеристике, полученной по результатам эксперимента. В приложении реализовано построение целевой функции, использующей все степени свободы выборки экспериментальных значений, по методу наименьших квадратов. Поиск параметров реализован методом сканирования, симплекс-методом, методом Гаусса–Зейделя и методом наискорейшего спуска. Исследуемый канал передачи может быть описан как последовательное соединение апериодического звена первого порядка с интегрирующим звеном и звеном запаздывания или как канал «возмущающее воздействие – управляемая величина» регулируемого объекта с одноконтурной системой управления.

Приложение протестировано на данных, полученных с реального лабораторного объекта – эмулятора печи, обдуваемого воздухом. По полученным трендам на обученной нейросетевой модели проведен вычислительный эксперимент, результатом которого являются комплексные частотные характеристики управляемого объекта. По полученным экспериментальным комплексным частотным характеристикам найдены параметры каналов передачи управляемого объекта с помощью реализованных в приложении оптимизационных методов и методом последовательного квадратичного программирования в приложении MATLAB. По результатам идентификации составлена имитационная модель лабораторного объекта, которая выдает значения температуры печи со средним квадратичным отклонением от ее реальных значений, не превышающим 1,5 °С.

Ключевые слова: управляемый объект, идентификация, комплексная частотная характеристика, передаточная функция, метод наименьших квадратов, численные методы оптимизации, метод сканирования, метод Гаусса–Зейделя, симплекс-метод, метод наискорейшего спуска.

M.A. Rabotnikov, A.S. Aleksandrova, A.G. Shumikhin

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

AUTOMATION OF PROCESSING OF EXPERIMENTAL COMPLEX FREQUENCY CHARACTERISTICS WITH IDENTIFICATION OF THE CONTROLLED OBJECT

One way to investigate the dynamics of technological objects is the identification of object channels based on determining their structure and parameters from the observed input and output values of the object, using frequency methods. The result of these studies is a set of experimental data containing the values of the complex frequency response for a particular set of frequencies. In this article, the results of development and testing software application that is designed to process the results of such measurements are presented.

The application makes it possible to search for the values of the parameters of the transfer function of the investigated object from the experimentally found its complex frequency response. The application implements the construction of the objective function, using all degrees of freedom of sampling of experimental values, using the method of least squares. Parameter search is based on scan method, simplex method, Gauss-Seidel method and gradient method. The investigated channel can be described as a serial connection of an aperiodic link of the first order with an integro-differentiating link and a time delay link or as a channel "disturbance – controlled variable" of a regulated object with a single-loop control system.

The software application was tested on the data obtained from a real laboratory object – an emulator of an air-blast furnace. Computational experiment based on the experimental data was carried out on a neural network model, which resulted in the complex frequency characteristics of the controlled object. The parameters of the channels of the controlled object were found by optimization methods implemented in the software application and by the method of sequential quadratic programming in the application MATLAB from the experimental complex frequency characteristics obtained. The imitation model of a laboratory facility was produced based on the identification results, which gives the furnace temperature with the root-mean-square deviation from its actual values not exceeding 1.5 °C.

Keywords: *controlled object, identification, complex frequency response, transfer function, least squares method, numerical optimization methods, scan method, Gauss Seidel method, simplex method, gradient method.*

Идентификации технологических объектов посвящено множество исследований [1–4]. Одним из эффективных подходов является использование частотных методов [5]. Известны пассивные методы частотного анализа с использованием взаимно корреляционной и автокорреляционной функций случайных процессов на входе и выходе исследуемого объекта с последующим построением комплексной частотной характеристики. Также существуют активные методы прямого построения комплексной частотной характеристики путем последовательного воздействия на исследуемый объект или его динамическую

модель периодическими испытательными сигналами с различной частотой. Результатом подобных испытаний является набор экспериментальных данных, содержащий значения комплексной частотной характеристики для определенного набора частот [6].

С целью автоматизации процесса обработки результатов подобных экспериментов разработано программное приложение для поиска значений параметров передаточной функции канала передачи исследуемого объекта по найденной экспериментально его комплексной частотной характеристике [7]. Предусмотрен выбор вида передаточной функции объекта управления, а также алгоритма поиска ее параметров.

На основании выбранного вида передаточной функции составляется аппроксимирующая комплексная частотная характеристика. Решение следующей задачи нелинейного программирования, использующей все степени свободы выборки экспериментальных значений $\text{Re}^e(\omega_v)$ и $\text{Im}^e(\omega_v)$, дает оценки по методу наименьших квадратов параметров передаточной функции [8, 9]:

$$\left\{ \begin{aligned} \Phi(\vec{b}, \vec{a}, k, \tau) &= \sum_{v=1}^N (\text{Re}^e(\omega_v) - \text{Re}^{ap}(\omega_v))^2 + \\ &+ \sum_{v=1}^N (\text{Im}^e(\omega_v) - \text{Im}^{ap}(\omega_v))^2 \rightarrow \min_{\vec{b}, \vec{a}, k, \tau} \end{aligned} \right\} \rightarrow \\ \rightarrow \vec{b}^0, \vec{a}^0, k^0, \tau^0, \quad (1)$$

где k – коэффициент передачи объекта; τ – чистое запаздывание; \vec{b} , \vec{a} – другие параметры передаточной функции объекта; $\vec{b}^0, \vec{a}^0, k^0, \tau^0$ – оценки параметров передаточной функции объекта.

Для решения задачи (1) разработана программная реализация в среде Visual Basic for Application следующих методов оптимизации: сканирование, метод Гаусса–Зейделя, симплексный метод и метод наискорейшего спуска [10].

В разработанном приложении исследуемый канал передачи в общем виде описан как последовательное соединение аperiodического звена первого порядка с интегрирующим звеном и звеном запаздывания:

$$W_y(s) = k_y \frac{bs + 1}{a_2 s^2 + a_1 s + 1} e^{-s\tau}. \quad (2)$$

Исследуемый канал передачи может быть описан так же, как канал «возмущающее воздействие – управляемая величина» регулируемого объекта с одноконтурной системой управления (рис. 1).

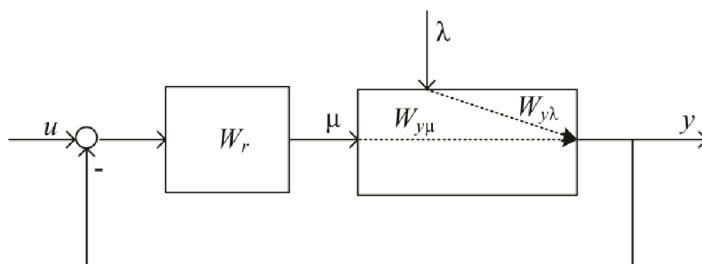


Рис. 1. Структура одноконтурной системы управления, где $W_{yu}(s)$ – передаточная функция технологического объекта по каналу «управляющее воздействие – управляемая величина»; $W_r(s)$ – передаточная функция регулятора; $W_{y\lambda}(s)$ – передаточная функция технологического объекта по каналу «возмущающее воздействие – управляемая величина»

Передаточную функцию канала «возмущающее воздействие – управляемая величина» системы управления можно представить в виде

$$W_{y\lambda}^{sys}(s) = \frac{W_{y\lambda}(s)}{1 + W_{yu}(s)W_r(s)}, \quad (3)$$

а передаточную функцию ПИД-регулятора – в виде

$$W_r(s) = k_r + \frac{k_r}{T_i s} + k_r T_d s, \quad (4)$$

где k_r – коэффициент передачи регулятора; T_i – постоянная интегрирования регулятора; T_d – постоянная времени дифференцирования. Параметры передаточной функции (4), как правило, известны.

В приложении каналы передачи управляемого объекта можно описать в виде последовательного соединения апериодического звена первого порядка с интегродифференцирующим звеном и звеном запаздывания.

С учетом выражений (2) и (4) передаточная функция канала «возмущающее воздействие – управляемая величина» (3) примет вид

$$W_{y\lambda}^{sys}(s) = \frac{k_{y\lambda} \frac{b_\lambda s + 1}{a_{2\lambda} s^2 + a_{1\lambda} s + 1} e^{-\sigma\tau_{y\lambda}}}{1 + k_{yu} \frac{b_\mu s + 1}{a_{2\mu} s^2 + a_{1\mu} s + 1} e^{-\sigma\tau_{yu}} \left(k_r + \frac{k_r}{T_i s} + k_r T_d s \right)}.$$

Параметрами передаточной функции, подлежащими определению, являются $k_{y\lambda}$, $\tau_{y\lambda}$, b_{λ} , $a_{1\lambda}$, $a_{2\lambda}$, $k_{y\mu}$, $\tau_{y\mu}$, b_{μ} , $a_{1\mu}$, $a_{2\mu}$.

На рис. 2 представлен интерфейс приложения.

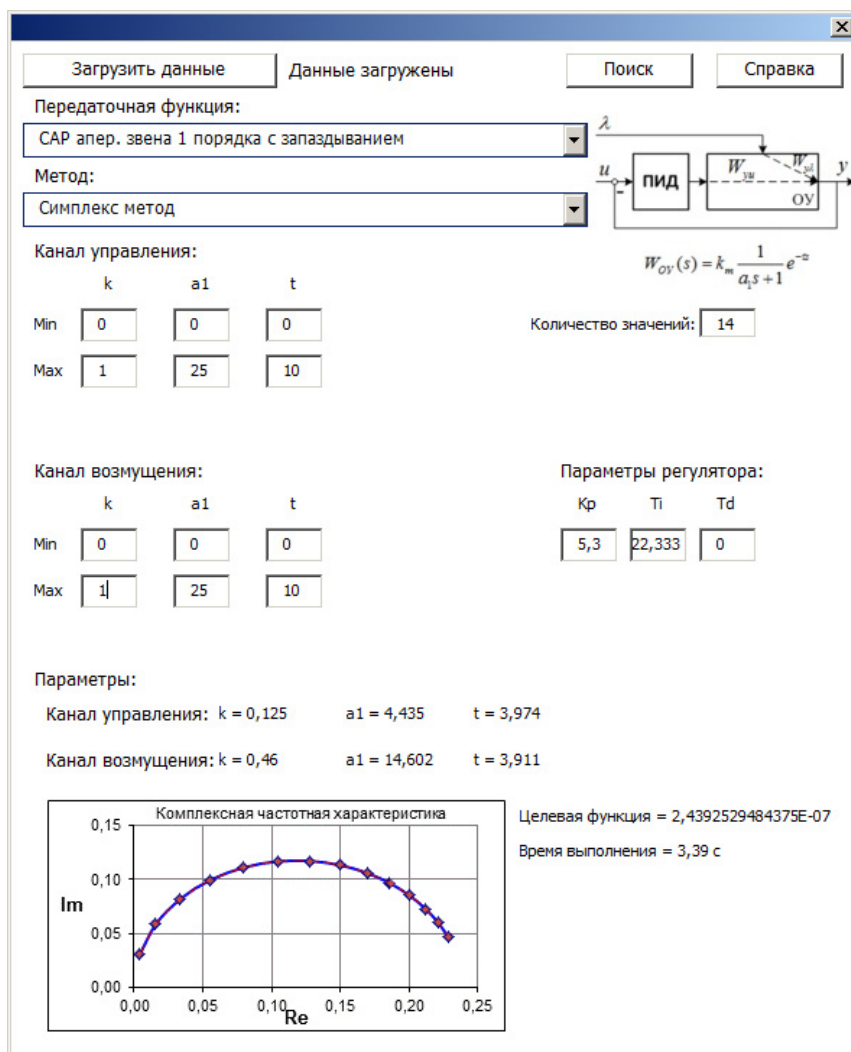


Рис. 2. Интерфейс приложения

Для поиска параметров передаточной функции необходимо загрузить экспериментальные данные и выбрать вид передаточной функции. На основании выбранного вида передаточной функции автоматически составляется аппроксимирующая комплексная частотная характеристика и формируется целевая функция. Далее необходимо выбрать метод решения задачи (1), диапазон допустимого изменения искомых параметров, а также параметры регулятора в канале управления объекта.

После выполнения алгоритма в окне программы появляются значения искомым параметров, значение целевой функции и время выполнения алгоритма в секундах. Также на графике отображаются экспериментальная и построенная по результатам идентификации параметров передаточной функции канала передачи управляемого объекта комплексные частотные характеристики.

Идентификация каналов передачи лабораторного объекта

Разработанное приложение протестировано на реальном лабораторном объекте – эмуляторе печи. Схема лабораторной установки представлена на рис. 3.

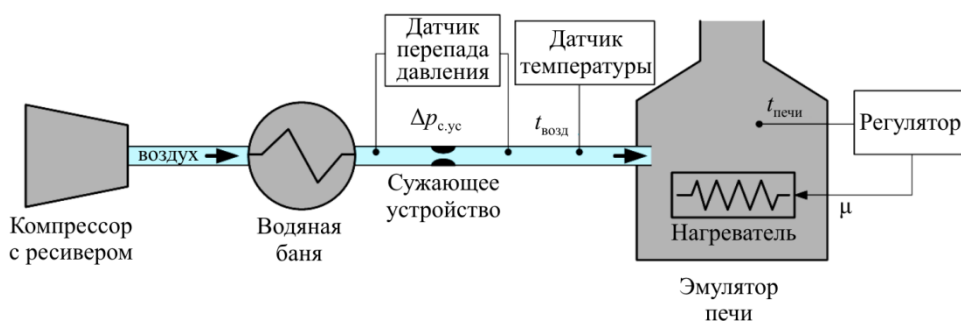


Рис. 3. Лабораторная установка

Эмулятор печи обдувается воздухом, который проходит через змеевик, помещенный на водяную баню и сужающее устройство [11]. Температура печи регулируется изменением напряжения тока на нагревателе. Для тестирования лабораторный объект работал в режиме автоматического регулирования. Результатом эксперимента на лабораторном объекте являются тренды температуры печи, температуры воздуха, перепада давления на сужающем устройстве и напряжения тока на нагревателе от времени. Измеряемые параметры регистрировались с периодом, равным 1 с.

Полученные в ходе лабораторного эксперимента данные использовались для построения модели управляемого лабораторного объекта с использованием технологии нейронных сетей [12–14]. Обученная нейронная сеть аппроксимирует поведение лабораторного объекта, работающего в динамическом режиме. На полученной нейросетевой модели проведен вычислительный эксперимент, результатом которого являются комплексные частотные характеристики (КЧХ) по каналам

«перепад давления на сужающем устройстве – температура печи» и «температура воздуха на обдув – температура печи» с замкнутыми контурами по каналу управления, представленные на рис. 4 и 5.

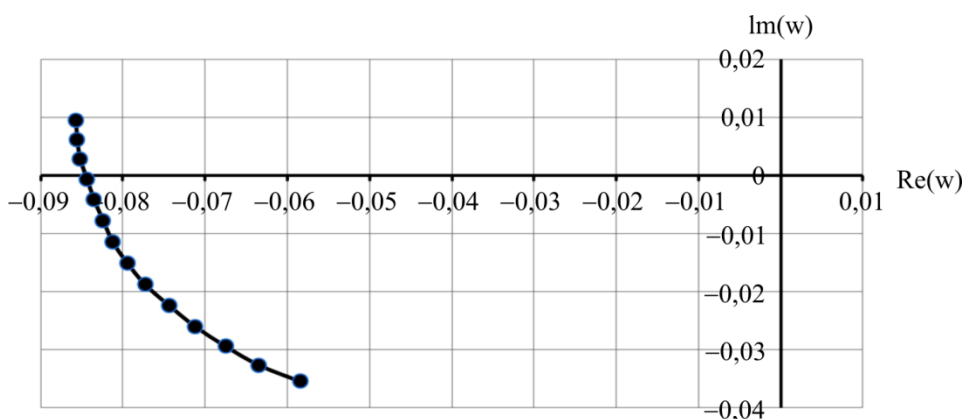


Рис. 4. КЧХ по каналу «перепад давления на сужающем устройстве – температура печи»

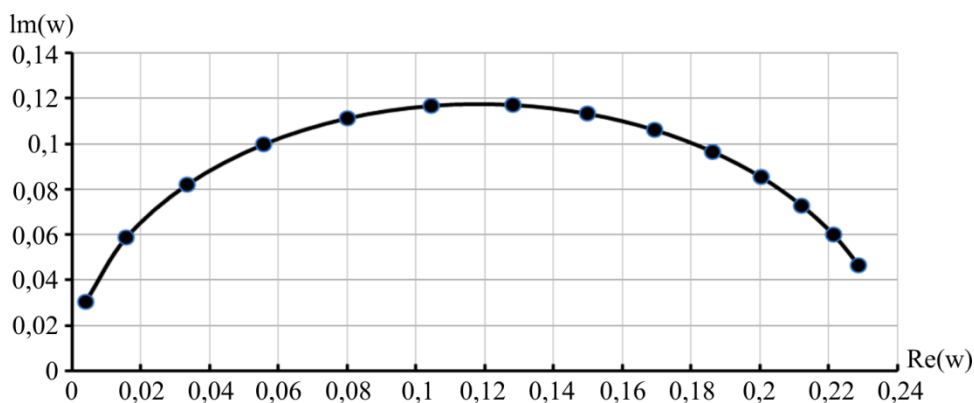


Рис. 5. КЧХ по каналу «температура воздуха на обдув – температура печи»

По полученным экспериментальным комплексным частотным характеристикам найдены параметры каналов передачи лабораторного объекта с использованием разработанного программного приложения методами сканирования, симплекс-методом и методом наискорейшего спуска. С целью оценки полученных результатов также найдены параметры каналов передачи методом последовательного квадратичного программирования (SQP) с помощью расширения MATLAB – Optimization toolbox [15]. Результаты идентификации параметров передаточной функции объекта для комплексных частотных характеристик

по каналам «перепад давления на сужающем устройстве – температура печи» и «температура воздуха на обдув – температура печи» представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты идентификации объекта по КЧХ канала
«перепад давления на сужающем устройстве – температура печи»

КЧХ 1		Методы оптимизации			
Канал	Параметр модели	Сканирование	Симплексный	Наискорейшего спуска	SQP (MATLAB)
возмущения	$k_{\gamma\lambda}$	-0,14	-0,129	-0,132	-0,136
	$a_{\gamma\lambda}$	8	8,94	13,161	5,642
	$\tau_{\gamma\lambda}$	7	7,078	2,649	7,577
управления	$k_{\gamma\mu}$	0,12	0,111	0,111	0,11
	$a_{\gamma\mu}$	5	4,401	11,971	3,401
	$\tau_{\gamma\mu}$	5	9,233	2,366	3,001

Таблица 2

Результаты идентификации объекта по КЧХ канала
«температура воздуха на обдув – температура печи»

КЧХ 2		Методы оптимизации			
Канал	Параметр модели	Сканирование	Симплексный	Наискорейшего спуска	SQP (MATLAB)
возмущения	$k_{\gamma\lambda}$	0,44	0,405	0,397	0,426
	$a_{\gamma\lambda}$	14,5	11,532	13,896	15,792
	$\tau_{\gamma\lambda}$	4,5	5,207	5,468	2,689
управления	$k_{\gamma\mu}$	0,12	0,111	0,11	0,116
	$a_{\gamma\mu}$	5	4,401	11,971	11,01
	$\tau_{\gamma\mu}$	5	9,233	2,366	0

В графической среде моделирования Simulink составлены имитационные модели лабораторного объекта с параметрами, найденными программно реализованными методами оптимизации. На рис. 6 представлена структура построенных имитационных моделей эмулятора печи.

Составленные имитационные модели были протестированы на данных, полученных экспериментально на лабораторном объекте. Входными сигналами являются изменения перепада давления на сужающем устройстве, температуры воздуха на обдув и изменения напряжения тока на нагревателе. На выходе модели регистрируется изменение температуры печи.

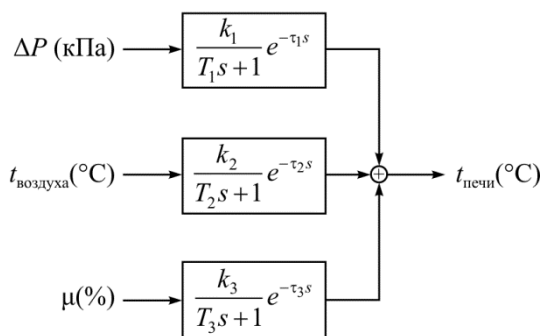


Рис. 6. Структура имитационной модели лабораторного объекта

На рис. 7 качественно представлены графики изменения температуры печи во времени: реальные значения температуры печи; значения, полученные в имитационной модели по результатам идентификации передаточной функции объекта с помощью приложения, разработанного методом сканирования; симплексным методом; методом наискорейшего спуска; с помощью математической среды MATLAB методом SQP.

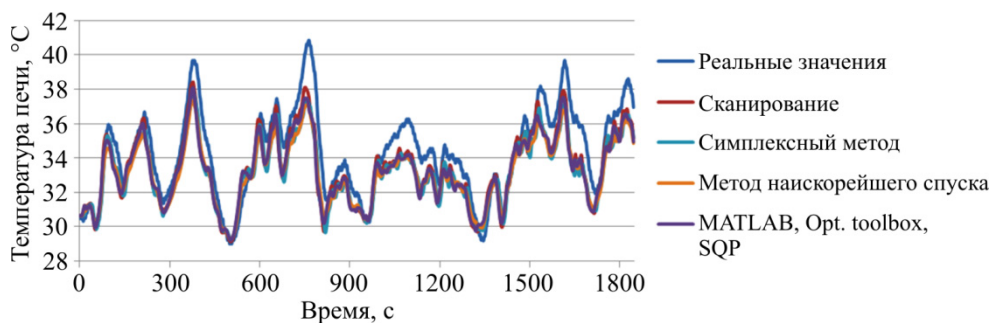


Рис. 7. Тестирование имитационной модели

Для оценки использованных оптимизационных методов по трендам (см. рис. 7) получены значения среднего квадратичного отклонения (СКО) реального значения температуры печи от значений, рассчитанных в вычислительном эксперименте по моделям с параметрами, найденными при идентификации объекта. Значения среднего квадратичного отклонения температуры печи σ , °C, рассчитанные сканированием – 1,341, симплексным методом – 1,464, методом наискорейшего спуска – 1,443, SQP (MATLAB) – 1,497.

Заключение

Разработанное приложение позволяет найти параметры передаточной функции канала передачи исследуемого объекта по найденной экспериментально его комплексной частотной характеристике. Отличительной особенностью программного приложения является возможность идентификации каналов динамического объекта по КЧХ замкнутого контура регулирования, а также автоматизация процесса формирования целевой функции по заданному пользователем виду передаточной функции канала передачи динамического объекта.

Приложение протестировано на данных с реального управляемого лабораторного объекта – эмулятора печи. Реализованные в приложении оптимизационные методы позволяют найти параметры моделей каналов передачи управляемого объекта. Построенная с параметрами передаточной функции объекта, найденными различными методами оптимизации в программном приложении, имитационная модель выдает значения температуры печи с СКО от ее реальных значений, не превышающим 1,5 °С.

Список литературы

1. Марголис Б.И., Фатчихин П.К. Идентификация модели объекта по частотным характеристикам // Вестник Тверского государственного технического университета. – 2017. – № 2. – С. 17–21.
2. Понятский В.М., Ту Зунг. Оценка коэффициентов модели динамического объекта с помощью конечно-частотного метода идентификации в условиях пассивного эксперимента // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 2. – С. 247–257.
3. Богданов Н.В., Сорока Г.А., Шелухин В.Ю. Идентификация объекта управления с использованием искусственной нейронной сети // Актуальные проблемы технических наук / ООО «Аэтерна». – Уфа, 2015. – С. 24–30.
4. Кривоносов В.А., Дурнева Ю.В. Идентификация объекта по результатам его нормальной эксплуатации в замкнутом контуре управления // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5, № 1. – С. 44–47.
5. Пьявченко Т.А. Метод идентификации промышленного объекта по его временной и частотной характеристикам // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 7. – С. 216–219.
6. Лапин Э.С., Силачев В.В. Способ идентификации объектов управления // Изв. высш. учеб. заведений. Горный журнал. – 2008. – № 6. – С. 52–56.
7. Работников М.А., Бояршинова А.С., Шумихин А.Г. Автоматизация поиска значений параметров передаточной функции канала передачи по экспериментальной комплексной частотной характеристике // Вестник Пермско-

го национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2017. – № 2. – С. 63–76. DOI: 10.15593/2224-9400/2017.2.05

8. Турчак Л.И., Плотников П.В. Основы численных методов. – М.: Физматлит, 2003. – 304 с.

9. Трифонов А.Г. Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения: сайт. – URL: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2/index.php (дата обращения: 11.09.2017).

10. Гартман Т.Н., Клушин Д.В. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов: учеб. пособие. – М.: Академкнига, 2006. – 416 с.

11. Математическое моделирование химико-технологических процессов / Ас.М. Гумеров, Н.Н. Валеев, Аз.М. Гумеров, В.М. Емельянов. – Казань: Изд-во КГПУ, 2006. – 77 с.

12. Шумихин А.Г., Бояршинова А.С. Идентификация сложного объекта управления по частотным характеристикам, полученным экспериментально на его нейросетевой динамической модели // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 4. – С. 125–134.

13. Шумихин А.Г., Бояршинова А.С. Алгоритм выбора структурных параметров искусственной нейронной сети и объема обучающей выборки при аппроксимации поведения динамического объекта // Компьютерные исследования и моделирование. – 2015. – Т. 7, № 2. – С. 243–251.

14. Пархоменко С.С., Леденева Т.М. Обучение нейронных сетей методом Левенберга–Марквардта в условиях большого количества данных // Вестник Воронежского государственного университета. Системный анализ и информационные технологии. – 2014. – № 2. – С. 98–106.

15. Гольдштейн А. Л. Оптимизация в среде MATLAB: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – 164 с.

References

1. Margolis B.I., Fatchichin P.K. Identifikatsiia modeli ob"ekta po chastotnym kharaktristikam [Identification of the object model by frequency characteristics]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no. 2, pp. 17-21.

2. Poniatskii V.M., Tu Zung. Otsenka Koeffitsientov modeli dinamicheskogo ob"ekta s pomoshch'iu konechno-chastotnogo metoda identifikatsii v usloviakh passivnogo eksperimenta [Estimation of factors of model of dynamic object by means of an is final – frequency method of identification in the conditions of passive experiment]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 2, pp 247-257.

3. Bogdanov N.V., Soroka G.A., Shelukhin V.Iu. Identifikatsiia ob"ekta upravleniia s ispol'zovaniem iskusstvennoi neuronnoi seti [Identification of a control object using an artificial neural network]. *Aktual'nye problemy tekhnicheskikh nauk*. Ufa, Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'iu "Aeterna", 2015, pp. 24-30.

4. Krivonosov V.A., Durneva Y.V. Identifikatsiia ob"ekta po rezul'tatam ego normal'noi ekspluatatsii v zamknutom konture upravleniia [Identification of object by results of its normal functioning in the closed control system]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 7, no. 6, pp. 44-47.

5. P"iavchenko T.A. Metod identifikatsii promyshlennogo ob"ekta po ego vremennoi i chastotnoi kharakteristikam [Method of identification of the industrial object with its characteristics for time and frequency]. *Izvestiia Iufu. Tekhnicheskie nauki*, 2010, no. 7, pp. 216-219.

6. Lapin E.S., Silachev V.V. Sposob identifikatsii ob"ektov upravleniia [Method of identification of objects monitoring]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2008, no. 6, pp. 52-56.

7. Rabotnikov M.A., Boiarshinova A.S, Shumikhin A.G. Automation search of transfer function parameters according to experimental complex frequency response. Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University Chemical Technology and Biotechnology, 2017, no. 2, pp. 63-76. DOI: 10.15593/2224-9400/2017.2.05

8. Turchak L.I., Plotnikov P.V. Osnovy chislennykh metodov [Bases of numerical methods]. Moscow, Fizmatlit, 2003, 304 p.

9. Trifonov A.G. Postanovka zadachi optimizatsii i chislennye metody ee resheniia, available at: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2/index.php (accessed 11 September 2017).

10. Gartman T.N., Klushin D.V. Osnovy komp'iuternogo modelirovaniia khimiko-tekhnologicheskikh protsessov [Basics of computer modeling of chemical-technological processes]. Moscow, Akademkniga, 2006, 416 p.

11. Gumerov As.M., Valeev N.N., Gumerov Az.M., Emel'ianov V.M. Matematicheskoe modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov [Mathematical modeling of chemical-technological processes]. Kazan', Izdatel'stvo KGGPU, 2006, 77 p.

12. Shumikhin A.G., Boiarshinova A.S. Identifikatsiia slozhnogo ob"ekta upravleniia po chastotnym kharakteristikam, poluchennym eksperimental'no na ego neurosetevoi dinamicheskoi modeli [Identification of a complex control object based on frequency characteristics obtained experimentally on neural network dynamic model]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2015, no. 4, pp. 125-134.

13. Shumikhin A.G., Boiarshinova A.S. Algoritm vybora strukturnykh parametrov iskusstvennoi neuronnoi seti i ob"ema obuchaiushchei vyborki pri approksimatsii povedeniia dinamicheskogo ob"ekta [Algorithm for selecting the structural parameters of an artificial neural network and the volume of a training sample in the approximation of the behavior of a dynamic object]. *Komp'iuternye issledovaniia i modelirovanie*, 2015, vol. 7, no. 2, pp. 243-251.

14. Parkhomenko S.S., Ledeneva T.M. Obuchenie neuronnykh setei metodom Levenberga-Markvardta v usloviakh bol'shogo kolichestva dannykh [Training neural networks of the method Levenberg-Marquardt in larger the amount of data]. *Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. seriia: sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii*, 2014, no. 2, pp. 98-106.

15. Gol'dshtein A.L. Optimizatsiia v srede MATLAB [Optimization in the MATLAB]. Perm, Izdatel'stvo PNIPU, 2015, 164 p.

Получено 20.01.2018

Об авторах

Работников Михаил Алексеевич (Пермь, Россия) – бакалавр кафедры автоматизации технологических процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: rabotnikovma@gmail.com).

Александрова Анна Сергеевна (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры автоматизации технологических процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: boyarshinovaann@gmail.com).

Шумихин Александр Георгиевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: shumichin@gmail.com).

About the authors

Mikhail A. Rabotnikov (Perm, Russian Federation) – Bachelor, Department of automation technological processes, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: rabotnikovma@gmail.com).

Anna S. Aleksandrova (Perm, Russian Federation) – Senior lecturer, Department of automation technological processes, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: boyarshinovaann@gmail.com).

Aleksandr G. Shumikhin (Perm, Russian Federation) – Doctor of technical sciences, Professor, Head of department of automation of technological processes, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: shumichin@gmail.com).