

DOI: 10.15593/2224-9400/2017.2.05

УДК 519.651

**М.А. Работников, А.С. Бояршинова, А.Г. Шумихин**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОИСКА ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ  
ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ  
ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ  
ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ**

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

*Приложение позволяет производить поиск значений параметров передаточной функции канала передачи исследуемого объекта по найденной экспериментально его комплексной частотной характеристике. В приложении реализовано построение целевой функции, использующей все степени свободы выборки экспериментальных значений, по методу наименьших квадратов. Поиск параметров реализован методами сканирования и Гаусса–Зейделя, также для сравнения результатов реализован ручной подбор параметров управляемого объекта. Предусмотрена возможность выбора передаточной функции канала передачи: апериодическое звено первого порядка, апериодическое звено второго порядка, а также канал может быть описан как апериодическое звено первого порядка с обратной связью.*

*В качестве демонстрации работоспособности приложения представлены примеры идентификации имитационного канала передачи, представляющего собой апериодическое звено второго порядка с запаздыванием, идентификации каналов передачи, управляемого имитационного объекта с запаздыванием, а также каналов передачи лабораторного объекта – эмулятора печи. Для оценки результатов эксперимента на лабораторном объекте произведено их сравнение с результатами решения этой же оптимизационной задачи в приложении MATLAB (Optimization Toolbox) методом SQP.*

*В результате проведенных экспериментов метод сканирования показал хорошие результаты. Найденные методом сканирования параметры отличаются от заданных в имитационной модели или найденных через приложение MATLAB (Optimization Toolbox) не более чем на 17,2 %. При идентификации имитационного канала передачи, представляющего собой апериодическое звено второго порядка с запаздыванием, метод Гаусса–Зейделя позволяет найти грубые оценки параметров объекта (отличие найденных параметров от заданных достигает 40 %), которые могут быть использованы как окрестности для дальнейшего поиска. Для идентификации каналов с обратной связью метод Гаусса–Зейделя не дает удовлетворительных результатов.*

**Ключевые слова:** *оптимизация, комплексная частотная характеристика, передаточная функция, метод наименьших квадратов, метод сканирования, метод Гаусса–Зейделя.*

**M.A. Rabotnikov, A.S. Boyarshinova, A.G. Shumikhin**

Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russian Federation

## **AUTOMATION SEARCH OF TRANSFER FUNCTION PARAMETERS ACCORDING TO EXPERIMENTAL COMPLEX FREQUENCY RESPONSE**

*One way to investigate the dynamics of technological objects is the identification of 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 the developed 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 and Gauss-Seidel method, and manual matching of the parameters of the control object is also implemented to compare the results. It is possible to choose the transfer function of the transmission channel: an aperiodic link of the first order, an aperiodic link of the second order, and also the channel can be described as a first-order aperiodic link with feedback.*

*As a demonstration of the operability of the application, examples are given of identifying the imitation transmission channel representing a second-order aperiodic link with delay, identifying the transmission channels of a controlled imitation object with delay, and the transmission channels of the laboratory object – the furnace emulator. To evaluate the experimental results on a laboratory object, they were compared with the results of solving the same optimization task in the Matlab (Optimization Toolbox) using the SQP method.*

*As a result of the experiments, the scanning method showed good result. The parameters found by the scan method differ from those specified in the imitation model or found in the Matlab (Optimization Toolbox) application by no more than 17.2%. When identifying the imitation transmission channel, which is a second-order aperiodic element with a delay, the Gauss-Seidel method allows us to find rough estimates of the parameters of the object (the difference of the found parameters from the preset reaches 40%), which can be used as a neighborhood for further searching. The Gauss-Seidel method does not give satisfactory results for the identification of channels with feedback.*

**Keywords:** *optimization, complex frequency response, transfer function, least-squares method, scan method, Gauss-Seidel method.*

Одним из способов исследования динамики технологических объектов является идентификация каналов объекта с использованием частотных методов [1]. 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 (КЧХ). 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 [2].

С целью упрощения обработки результатов подобных измерений разработан пакет программ для поиска значений параметров передаточной функции канала передачи исследуемого объекта по найденной экспериментально его комплексной частотной характеристике. Предусмотрен выбор вида передаточной функции, а также алгоритма поиска ее параметров.

На основании выбранного вида передаточной функции составляется аппроксимирующая комплексная частотная характеристика. Ре-

шение задачи нелинейного программирования, использующей все степени свободы выборки экспериментальных значений  $\operatorname{Re}^e(\omega_v)$  и  $\operatorname{Im}^e(\omega_v)$ , дает оценки по методу наименьших квадратов параметров передаточной функции [3–6]:

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

где  $k$  – коэффициент передачи объекта;  $\tau$  – чистое запаздывание;  $bi$ , ( $i = \overline{1, m}$ ),  $ak$ , ( $k = \overline{1, n}$ ) – другие параметры передаточной функции объекта;  $\vec{b}^0, \vec{a}^0, k^0, \tau^0$  – оценки параметров передаточной функции объекта.

Предусмотрено решение задачи (1) методом сканирования и методом Гаусса–Зейделя. Метод сканирования заключается в последовательном переборе и сравнении значений функции во всех точках некоторого подмножества допустимого множества [7]. Метод Гаусса–Зейделя заключается в покоординатном поиске экстремума любым из методов одномерной оптимизации [8].

Метод сканирования считается глобальным методом. Его достоинствами являются высокая точность, отсутствие ограничений на способ задания функции и функциональные классы, к которым она может принадлежать. Последнее (наряду с большой трудоемкостью перебора) является в то же время и главным недостатком. В вычислительной практике метод сканирования редко применяется без комбинации с другими методами оптимизации [9].

Метод Гаусса–Зейделя не относится к глобальным методам. Его преимуществом по сравнению с методом сканирования является значительное уменьшение времени нахождения экстремума, но данный метод уступает в точности, так как не охватывает всё множество точек. Также данный метод не приводит к глобальному минимуму, если в результате очередного шага попадает на дно оврага, вытянутого не в направлении координат.

Поддерживаются три вида передаточных функций канала. Исследуемый канал передачи может быть описан аperiodическим звеном первого или второго порядка с запаздыванием:

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

где  $k_y$  – коэффициент передачи объекта;  $\tau$  – чистое запаздывание;  $b$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  – другие параметры объекта.

Исследуемый канал передачи может быть описан и как канал «возмущающее воздействие – управляемая величина» регулируемого объекта с одноконтурной системой управления (рис. 1), в которой приняты следующие обозначения  $W_{y\mu}(s)$  – 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».

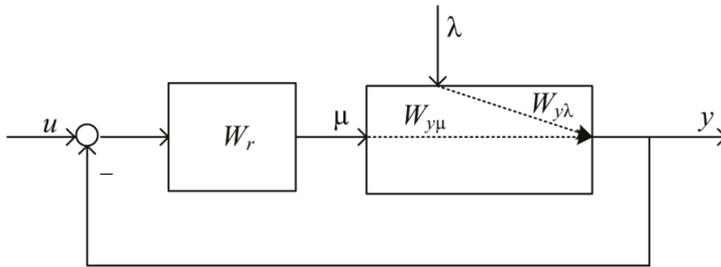


Рис. 1. Структура одноконтурной системы управления

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

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

Передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид

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

где  $k_r$  – коэффициент передачи регулятора;  $T_i$  – постоянная интегрирования регулятора;  $T_d$  – постоянная времени дифференцирования. Параметры передаточной функции (2), как правило, известны.

Предполагается, что каналы передачи управляемого объекта описываются апериодическими звеньями первого порядка с запаздыванием.

В результате (3) и (4) передаточная функция канала «возмущающее воздействие – управляемая величина» примет вид

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

Параметрами передаточной функций, подлежащими определению, являются  $k_{y\lambda}$ ,  $\tau_{y\lambda}$ ,  $a_\lambda$ ,  $k_{y\mu}$ ,  $\tau_{y\mu}$ ,  $a_\mu$ .

На рис. 2 представлен интерфейс программы.

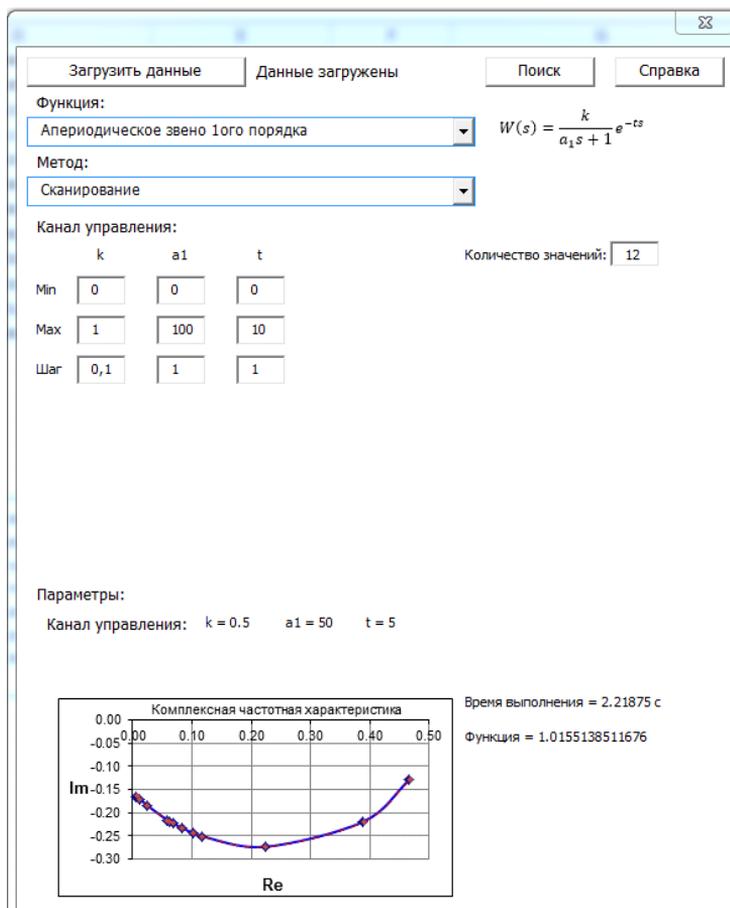


Рис. 2. Интерфейс программы

Для поиска параметров передаточной функции необходимо выбрать файл, содержащий экспериментальные данные, вид передаточной функции, алгоритм решения задачи (1), диапазон и шаг изменения искомых параметров, параметры регулятора для канала управляемого объекта.

После выполнения алгоритма в окне программы появляются значения искоемых параметров, значение функции оптимизации и время работы алгоритма в секундах. Экспериментальная комплексная частотная характеристика и характеристика, построенная на основании найденных значений параметров передаточной функции объекта, отображаются на графике.

Предусмотрена возможность подбора параметров вручную и коррекция найденных параметров.

### Пример идентификации каналов передачи с запаздыванием имитационного объекта

Для демонстрации возможностей предложенной программы исследована простая имитационная модель канала передачи динамического объекта, описываемого апериодическим звеном второго порядка с запаздыванием (2), где  $k = 0,7$ ,  $\tau = 2$ ,  $b = 0$ ,  $a_1 = 20$ ,  $a_2 = 100$ . В результате вычислительного эксперимента получена комплексная частотная характеристика данного канала (рис. 3).

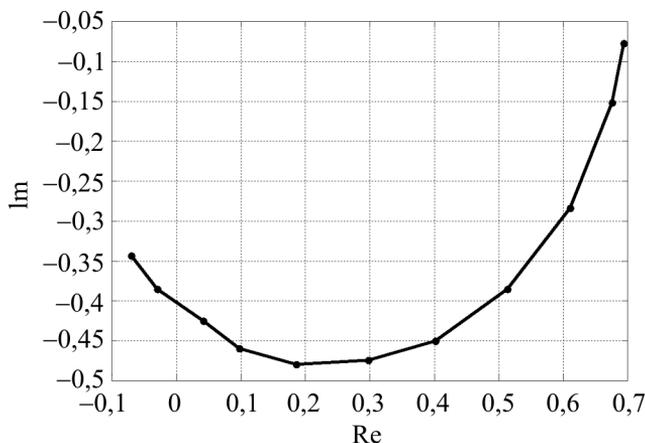


Рис. 3. Комплексная частотная характеристика канала передачи имитационного объекта

По полученным данным найдены параметры канала методом сканирования и методом Гаусса–Зейделя. Начальные условия и результаты поиска представлены в табл. 1.

Время выполнения оптимизационного алгоритма метода Гаусса–Зейделя меньше, но точность метода сканирования оказалась значительно выше. По полученным результатам поиска подсчитаны максимальные значения относительной приведенной погрешности для метода сканирования (10 %) и метода Гаусса–Зейделя (40 %):

$$\delta_{\max} = \frac{|x - x'|}{x_{\max} - x_{\min}} \cdot 100 \%,$$

где  $x$  – действительное значение параметра передаточной функции;  $x'$  – значение  $x$ , найденное методом сканирования или методом Гаусса–Зейделя;  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$  – максимальное и минимальное возможные значения параметра  $x$  соответственно, устанавливающие диапазон поиска.

Таблица 1

Начальные условия и результаты поиска параметров каналов передачи с запаздыванием имитационного объекта

Метод	Параметр	Миним. значение	Шаг	Максим. значение	Результат
Сканирование	$k$	0	0,1	1	0,7
	$b$	0	0,1	1	0,1
	$a_1$	0	1	100	20
	$a_2$	0	10	200	100
	$\tau$	0	1	10	2
Гаусса–Зейделя	$k$	0	0,1	1	0,7
	$b$	0	0,1	1	0,4
	$a_1$	0	1	100	21
	$a_2$	0	10	200	150
	$\tau$	0	1	10	0

**Пример идентификации каналов передачи управляемого объекта с запаздыванием**

Программа протестирована на простой имитационной модели системы управления, состоящая из объекта и регулятора. Объект имеет два входа и один выход и обладает различным транспортным запаздыванием по каналам передачи. Один из входов является управляющим воздействием  $\mu$ , второй – контролируемым возмущением  $\lambda$ . Выходная управляемая величина  $y$  изменяется в результате управляющего воздействия  $\mu$ , вырабатываемого регулятором, работающим по пропорционально-интегральному закону регулирования, на основании отклонения управляемой величины от задания. Структурная схема модели системы представлена на рис. 4, где  $k_{y\lambda} = -0,16$ ;  $\tau_{y\lambda} = 6$ ;  $a_{y\lambda} = 15$ ;  $k_{y\mu} = 0,15$ ;  $\tau_{y\mu} = 7$ ;  $a_{y\mu} = 10$ ;  $k_r = 5$ ,  $T_i = 20$ .

В результате вычислительного эксперимента получена комплексная частотная характеристика данного канала. По полученным данным найдены параметры контура методом сканирования и методом Гаусса–Зейделя. Начальные условия и результаты поиска представлены в табл. 2.

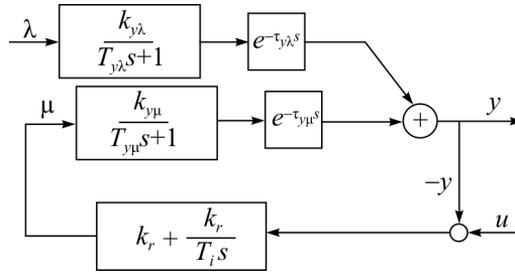


Рис. 4. Структурная схема имитационной модели системы управления

Таблица 2

Начальные условия и результаты поиска параметров канала передачи управляемого объекта с запаздыванием

Метод	Параметр	Миним. значения	Шаг	Максим. значения	Результат
Сканирование	$k_{y\lambda}$	-1	0,01	0	-0,16
	$a_{y\lambda}$	0	1	25	15
	$\tau_{y\lambda}$	0	1	10	6
	$k_{y\mu}$	0	0,01	1	0,15
	$a_{y\mu}$	0	1	25	10
	$\tau_{y\mu}$	0	1	10	7
Гаусса–Зейделя	$k_{y\lambda}$	-1	0,01	0	-0,63
	$a_{y\lambda}$	0	1	25	16
	$\tau_{y\lambda}$	0	1	10	5
	$k_{y\mu}$	0	0,01	1	0,64
	$a_{y\mu}$	0	1	25	1
	$\tau_{y\mu}$	0	1	10	0

Время выполнения оптимизационного алгоритма метода Гаусса–Зейделя меньше, но точность метода сканирования оказалась значительно выше. Метод сканирования достиг точки глобального экстремума, и его относительная приведенная погрешность составляет 0 %. Максимальное значение относительной приведенной погрешности метода Гаусса–Зейделя равно 70 %.

Для объектов с обратной связью метод Гаусса–Зейделя не дает удовлетворительных результатов.

### Пример идентификации каналов передачи лабораторного объекта

С целью иллюстрации изложенного подхода проведены исследования на лабораторной установке. Схема лабораторной установки представлена на рис. 5.

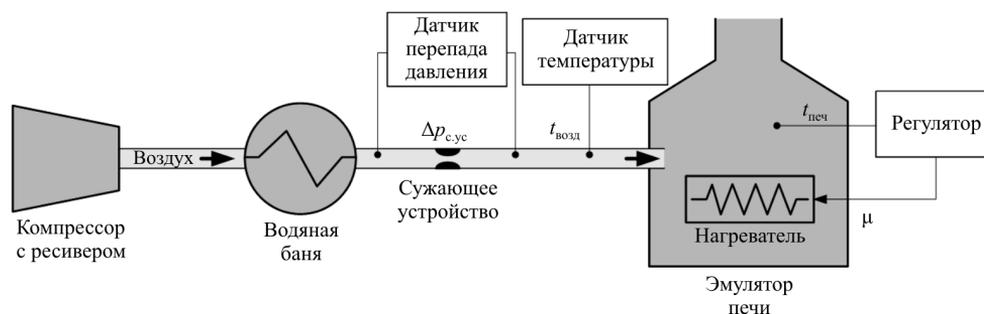


Рис. 5. Лабораторная установка

Объектом является эмулятор печи. Эмулятор печи обдувается воздухом. Воздух, подаваемый на обдув, проходит через змеевик, помещенный на водяную баню и сужающее устройство [10]. Температура печи, температура воздуха, перепад давления на сужающем устройстве и напряжения тока на нагревателе регистрируются с периодом, равным 1 с.

По данным, полученным в ходе лабораторного эксперимента, обучена динамическая нелинейная автокорреляционная нейронная сеть. Сеть имеет три внешних входа, 10 нейронов в скрытом слое и задержки на 15 тактов [11]. Функцией активации нейронов в скрытом слое является сигмоидальная функция активации – гиперболический тангенс, сеть обучалась по методу оптимизации Левенберга – Марквардта [12, 13]. Обученная нейронная сеть аппроксимирует поведение лабораторного объекта, работающего в динамическом режиме. На нейросетевой модели лабораторного объекта проведен вычислительный эксперимент по определению частотных характеристик каналов передачи («перепад давления на сужающем устройстве – температура печи», «температура воздуха на обдув – температура печи» и «изменение напряжения тока на нагревателе – температура печи»).

Таблица 3

Начальные условия и результаты поиска

Метод	Параметр	Миним. значения	Шаг	Максим. значения	Результат
Optimization toolbox (SQP)	$k_{v\lambda}$	-1	-	0	-0,123
	$a_{v\lambda}$	0	-	25	9,73
	$\tau_{v\lambda}$	0	-	10	5,655
	$k_{v\mu}$	0	-	1	0,104
	$a_{v\mu}$	0	-	25	9,3
	$\tau_{v\mu}$	0	-	10	5,645

Окончание табл. 3

Метод	Параметр	Миним. значения	Шаг	Максим. значения	Результат
Сканирование	$k_{y\lambda}$	-1	0,01	0	-0,14
	$a_{y\lambda}$	0	1	25	8
	$\tau_{y\lambda}$	0	1	10	7
	$k_{y\omega}$	0	0,01	1	0,12
	$a_{y\omega}$	0	1	25	5
	$\tau_{y\omega}$	0	1	10	5

По полученным комплексным частотным характеристикам найдены параметры каналов передачи лабораторного объекта методом сканирования. Для оценки результатов получено решение данной задачи с использованием приложения Optimization toolbox (MATLAB) [14]. Начальные условия, результаты поиска представлены в табл. 3.

Максимальная относительная приведенная погрешность метода сканирования в сравнении со значениями, полученными в Optimization toolbox, равна 17,2 %.

### Заключение

Разработанное приложение позволяет найти параметры передаточной функции канала передачи исследуемого объекта по найденной экспериментально его комплексной частотной характеристике. По результатам проведенного тестирования программы метод сканирования показал хорошие результаты. Найденные методом сканирования параметры отличаются от заданных в имитационной модели не более чем на 10 %, для лабораторного объекта найденные параметры отличаются от найденных через приложение MATLAB (Optimization Toolbox) не более чем на 17,2 %. Метод Гаусса–Зейделя показал менее точные результаты. При идентификации имитационного канала передачи, представляющего собой апериодическое звено второго порядка с запаздыванием, метод Гаусса–Зейделя позволяет лишь грубые оценки параметров объекта, которые могут быть использованы как окрестности для дальнейшего поиска. Отличие найденных параметров от заданных в имитационной модели достигает 40 %. Для идентификации каналов с обратной связью метод Гаусса–Зейделя не дает удовлетворительных результатов.

### Список литературы

1. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учеб. для вузов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – С. 345–350.
2. Бояринов А.И., Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии. – М.: Химия, 1975. – 564 с.

3. Турчак Л.И., Плотников П.В. Основы численных методов. – М.: Физматлит, 2003. – 304 с.
4. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение. – М.: Мир, 2001. – 424 с.
5. Калиткин Н.Н., Альшина Е.А. Численный анализ. – М.: Академия, 2013. – 262 с.
6. Трифонов А.Г. Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения: сайт. – URL: [http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book\\_2/index.php](http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2/index.php) (дата обращения: 15.02.2017).
7. Гартман Т.Н., Клушин Д.В. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов: учеб. пособие для вузов. – М.: Академкнига, 2006. – 416 с.
8. Алексеева Е.В., Кутненко О.А., Плясунов А.В. Численные методы оптимизации: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2008. – 127 с.
9. Городецкий С.Ю., Гришагин В.А. Модели и методы конечномерной оптимизации. – Ч. 2. Задачи и методы конечномерной оптимизации. – Нижний Новгород: Изд-во НГГУ, 2003. – 257 с.
10. Математическое моделирование химико-технологических процессов / А.М. Гумеров, Н.Н. Валеев, А.М. Гумеров, В.М. Емельянов. – Казань: Изд-во КГПУ, 2006. – 77 с.
11. 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.
12. 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.
13. Пархоменко С.С., Леденёва Т.М. Обучение нейронных сетей методом Левенберга–Марквардта в условиях большого количества данных [Электронный ресурс] // Вестник ВГУ. – 2014. – № 2. – С. 98–104. – URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21834126> (дата обращения: 27.02.2017).
14. Гольдштейн А.Л. Оптимизация в среде MATLAB: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – 164 с.

## References

1. Rotach V.Ia. Teoriia avtomaticheskogo upravleniia [Automatic control theory]. Moscow, Izdatel'skii dom MEI, 2008, pp. 345-350.

2. Boiarinov A.I., Kafarov V.V. *Metody optimizatsii v khimicheskoi tekhnologii* [Methods of optimization in chemical technology]. Moscow, Khimiia, 1975, 564 p.
3. Turchak L.I., Plotnikov P.V. *Osnovy chislennykh metodov* [Bases of numerical methods]. Moscow, Fizmatlit, 2003, 304 p.
4. Kakhaner D., Mouler K., Nesh S. *Chislennye metody i programmnoe obespechenie* [Numerical methods and software]. Moscow, Mir, 2001, 424 p.
5. Kalitkin N.N., Al'shina E.A. *Chislennyi analiz* [Numerical analysis]. Moscow, Akademiia, 2013, 262 p.
6. Trifonov A.G. *Postanovka zadachi optimizatsii i chislennye metody ee resheniia*, available at: [http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book\\_2/index.php](http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2/index.php) (accessed 15 February 2017).
7. 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.
8. Alekseeva E.V., Kutnenko O.A., Pliasunov A.V. *Chislennye metody optimizatsii* [Numerical optimization methods]. Novosibirsk, Izdatel'stvo Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta, 2008, 20 p.
9. Gorodetskii S.Iu., Grishagin V.A. *Modeli i metody konechnomernoi optimizatsii. Chast' 2. Zadachi i metody konechnomernoi optimizatsii* [Models and methods of finite-dimensional optimization. Part 2. Tasks and methods of finite-dimensional optimization]. Nizhnii Novgorod, Izdatel'stvo NGGU, 2003, 257 p.
10. Gumerov As.M., Valeev N.N., Gumerov Az.M., V.M. Emel'ianov. *Matematicheskoe modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov* [Mathematical modeling of chemical-technological processes]. Kazan', Izdatel'stvo KGGPU, 2006, 77 p.
11. Shumikhin A.G., Boiarshinova A.S. *Identifikatsiia slozhnogo ob"ekta upravleniia po chastotnym kharakteristikam, poluchennym eksperimental'no na ego neirosetevoi 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.
12. 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.

13. Parkhomenko S.S., Ledeneva T.M. Obuchenie neironnykh 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 VGU*, 2014, no. 2, pp 98-104, available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=21834126> (accessed 27 February 2017).

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

Получено 19.04.2017

### **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](mailto:rabotnikovma@gmail.com)).

**Бояршинова Анна Сергеевна** (Пермь, Россия) – ассистент кафедры автоматизации технологических процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: [boyarshinovaann@gmail.com](mailto: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](mailto: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., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: [rabotnikovma@gmail.com](mailto:rabotnikovma@gmail.com)).

**Anna S. Boyarshinova** (Perm, Russian Federation) – Assistant, Department of Automation Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: [boyarshinovaann@gmail.com](mailto:boyarshinovaann@gmail.com)).

**Aleksandr G. Shumikhin** (Perm, Russian Federation) – Doctor of technical science, professor, Head of Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: [shumichin@gmail.com](mailto:shumichin@gmail.com)).