

Для цитирования: Аликов А.Ю., Ковалева М.А., Рутковский А.Л., Тедеева Н.В. Автоматизация оптимальной идентификации передаточных функций динамических элементов сложных технологических объектов по кривым разгона. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (2):97-106. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-97-106

For citation: Alikov A.Yu., Kovaleva M.A., Rutkovskiy A.L., Tedeeva N.V. Automation of optimal identification of dynamic element transfer functions in complex technical objects based on acceleration curves. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (2):97-106. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-97-106

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.5.015

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-97-106

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО КРИВЫМ РАЗГОНА

Аликов А.Ю.³, Ковалева М.А.², Рутковский А.Л.¹, Тедеева Н.В.⁴.

¹⁻⁴Северо-Кавказский горно-металлургический институт

(государственный технологический университет),

¹⁻⁴362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, Россия,

¹e-mail: rutkowski@mail.ru, ²e-mail: mary_kovaleva@list.ru,

³e-mail: alan.alikov@rambler.ru, ⁴e-mail: nadiatedeeva@mail.ru

Резюме: *Цель.* Целью данной работы является минимизация ошибок аппроксимации кривых разгона, полученных экспериментально. **Метод.** На основе рассмотренных особенностей и недостатков хорошо известного метода Симою для расчета передаточных функций по кривым разгона разработан модифицированный вариант метода при помощи программных продуктов MathLab и MathCad. Он заключается в минимизации суммы квадратов отклонений экспериментальных точек от решения дифференциального уравнения в тех же точках. **Результат.** Проведен анализ методов осуществления параметрической идентификации и выбран наиболее эффективный из них – метод Симою. Проанализированы все его преимущества и недостатки, на основе чего, предложен метод, позволяющий производить идентификацию структуры и параметров передаточной функции по экспериментальной кривой разгона, а также выбор оптимальных численных значений этих параметров для минимизации ошибок аппроксимации кривых разгона, полученных экспериментальным путем. **Вывод.** Решена задача оптимального управления сложным технологическим комплексом: на базе модифицированного метода Симою был разработан алгоритм автоматизированного выбора оптимальной формы и расчета параметров передаточных функций динамических элементов сложных технологических объектов по кривым разгона каналов воздействия, который повышает эффективность расчета динамических характеристик объектов управления путем минимизации ошибок аппроксимации. Показана эффективность предложенного метода расчета. Простота данного метода позволяет применять его для практических расчетов, особенно для использования его при проектировании сложных технологических объектов в рамках системы автоматизированного проектирования. Предложенный метод позволяет повысить точность аппроксимации не менее чем на 20%, что так же является важным преимуществом для его практического использования.

Ключевые слова: передаточная функция, математическая модель, аппроксимация, оптимизация, идентификация

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

AUTOMATION OF OPTIMAL IDENTIFICATION OF DYNAMIC ELEMENT TRANSFER
FUNCTIONS IN COMPLEX TECHNICAL OBJECTS BASED
ON ACCELERATION CURVES

Alan Yu. Alikov³, Mariya A. Kovaleva², Aleksandr L. Rutkovskiy¹, Nadya V. Tedeeva⁴
¹⁻⁴North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)
44 Nikolaeva Str., Vladikavkaz 362021, Russia,
¹e-mail: rutkovski@mail.ru, ²e-mail: mary_kovaleva@list.ru,
³e-mail: alan.alikov@rambler.ru, ⁴e-mail: nadiatedeeva@mail.ru

Abstract Objectives The aim of present paper is to minimise the errors in the approximation of experimentally obtained acceleration curves. **Methods** Based on the features and disadvantages of the well-known Simoyu method for calculating transfer functions on the basis of acceleration curves, a modified version of the method is developed using the MathLab and MathCad software. This is based on minimising the sum of the squares of the experimental point deviations from the solution of the differential equation at the same points. **Results** Methods for the implementation of parametric identification are analysed and the Simoyu method is chosen as the most effective. On the basis of the analysis of its advantages and disadvantages, a modified method is proposed that allows the structure and parameters of the transfer function to be identified according to the experimental acceleration curve, as well as the choice of optimal numerical values of those parameters obtained for minimising errors in the approximation of the experimentally obtained acceleration curves. **Conclusion** The problem of optimal control over a complex technical facility was solved. On the basis of the modified Simoyu method, an algorithm for the automated selection of the optimal shape and calculation of transfer function parameters of dynamic elements of complex technical objects according to the acceleration curves in the impact channels was developed. This has allowed the calculation efficiency of the dynamic characteristics of control objects to be increased by minimising the approximation errors. The efficiency of the proposed calculation method is shown. Its simplicity makes it possible to apply to practical calculations, especially for use in the design of complex technical objects within the framework of the computer aided design system. The proposed method makes it possible to increase the accuracy of the approximation by at least 20%, which is an important advantage for its practical use.

Keywords: transfer function, mathematical model, approximation, optimisation, identification

Введение. Применение современных информационных технологий и методов создает возможность для поиска оптимальных условий проектирования сложных технологических объектов и процессов. Однако основополагающим фактором в конечном успехе поиска оптимальных условий является правильный выбор оптимизации и отражающего его критерия. Для перехода технологической системы из одного режима на другой и стабилизации последнего, объекты управления (технологические системы) требуют значительного количества информации о состоянии технологического режима, а также необходимого количества воздействия, которое необходимо к ней применить.

Благодаря вкладу выдающихся отечественных и зарубежных ученых в совершенствование численных методов, в современной науке появилась возможность описать натурный эксперимент математической моделью, исследовав ее и завершив вычислительным экспериментом с новыми результатами и рекомендациями по расширению возможностей функционирования различных объектов [1-17].

Постановка задачи. Несмотря на существенное развитие методов моделирования и оптимизации управления сложными технологическими системами вопросы построение эффективных систем управления на основе анализа способов интенсификации процессов, как частей

сложных технологических систем, к настоящему времени не нашли широкого применения. Поэтому главной задачей современной теории автоматизированного управления является создание методов оптимизации управления для достижения конечной цели или режима функционирования системы. При этом необходимо решить задачу оптимизации как количественных, так и качественных характеристик.

Методы исследования. Вопросы математического моделирования оптимизации производственных процессов сложных систем, в том числе и в рамках исследования операций, рассматривались во многих работах. Однако за счет сложности предлагаемых алгоритмов и трудности в их наладке специфика моделирования и управления сложными технологическими системами не выделена как самостоятельная сфера и базируется на традиционном использовании известных моделей. К таким сложностям можно отнести громоздкие вычислительные процедуры при анализе поведения объектов в динамических режимах – это ключевая задача проектирования алгоритмов управления [18].

Обычно имеется возможность экспериментального определения реакции системы на заданное возмущение и необходимо бывает определить передаточную функцию системы по этим экспериментальным кривым разгона. Проектируя системы регулирования, часто приходится сталкиваться с параметрической идентификацией, так как она является обязательным этапом идентификации передаточной функции объекта управления. В связи с этим разработано большое количество методов ее реализации, наиболее эффективным из которых является метод Симою [19-21]. Разработано сравнительно много различных методов аппроксимации моделей, например, при необходимости упрощенного расчета можно воспользоваться аппроксимацией звеном первого порядка, алгоритм которой представлен в [20].

Для более точного расчета необходимо разработать универсальную методику, которая независимо от передаточной функции объекта сможет выбрать оптимальную структуру передаточной функции и рассчитать ее параметры, а далее определить оптимальные численные значения расчетных параметров передаточной функции. Так как, если использовать известную схему метода площадей в классическом виде, то можно столкнуться со значительными погрешностями, которые могут привести к неправильным результатам. Несмотря на данные недостатки, универсальная методика будет разработана на основе метода Симою, модифицировав его, так как он очень удобен, особенно в условиях использования ЭВМ [21-22].

Суть предлагаемого метода заключается в минимизации суммы квадратов отклонений экспериментальных точек от решения дифференциального уравнение в тех же точках. Во время проведения практических расчетов, используя метод Симою, видно, что точность аппроксимации не возрастает при вычислении площадей выше четвертого порядка, но остаточная квадратичная ошибка аппроксимации, при этом, может быть достаточно большой. В связи с этим предложено использовать оценки параметров передаточной функции как нулевое приближение для решения задач минимизации квадратичной ошибки аппроксимации.

Объект управления можно представить в виде передаточной функции:

$$W_{об}(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + 1}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1} \cdot \exp(-\tau p), \quad (1)$$

для которой необходимо определить неизвестные коэффициенты: τ , a_1 , a_2 , ..., a_n ; и b_1 , b_2 , ..., b_m .

График изменения во времени управляемой величины $x(t)$ при ступенчатом изменении входной переменной $f(t)$ получен в результате активного эксперимента.

Передаточная функция объекта управления имеет вид:

$$W_{об}(p) = W_1(p) \cdot W_2(p), \quad (2)$$

где $W_1(p) = \exp(-\tau p)$. - передаточная функция звена транспортного запаздывания,

$$W_2(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + 1}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1}, \quad \text{- передаточная функция инерционного звена.}$$

Определить значение времени транспортного запаздывания τ можно непосредственно по графику кривой разгона, например, $\tau = 5$ сек. Остается определить передаточную функцию инерционного звена, для чего можно воспользоваться методом Симою, который и позволяет определить передаточную функцию модели объекта по кривой разгона.

Эту задачу реализуем с помощью пакета прикладных программ MathCAD [23]. Внесем необходимые данные: число точек в массиве $k=10$, шаг по времени $dt=0,1$, максимальное приращение входной величины $dx=15$.

Исходные данные по экспериментальной кривой разгона для расчёта передаточной функции в виде вектора

$$sigm := [35 \quad 35.3 \quad 35.6 \quad 38.5 \quad 39 \quad 40.2 \quad 41.5 \quad 42.2 \quad 42.5 \quad 43].$$

Первым этапом является преобразование ПФ в АФХ для всех значений параметров объекта, производим замену оператора $p = j \cdot \omega$, где $j = \sqrt{-1}$, ω – частота.

Задаем диапазон частот $\omega := 0,9$ Выделяем действительную часть уравнения $\text{Re}(j\omega)$:

$$U(\omega, a) := \text{Re}(W(j \cdot \omega, a)),$$

При использовании вещественной части переходная характеристика будет иметь вид:

$$h(t, a) := \frac{2 \cdot dx}{\pi} \int_0^{200} U(\omega, a) \frac{\sin(\omega \cdot t)}{\omega} d\omega.$$

Задаем диапазон точек: $t := 0,9$

$$h(t, a) := 35 + h(t, a).$$

Результат решения - передаточная функция инерциального звена, которая имеет вид:

$$W_2(p) = \frac{0,533 \cdot (1+p)}{2,533p^3 + 5,96p^2 + 4,066p + 1}.$$

Таким образом, после проведения расчетов, искомая математическая модель объекта управления имеет вид:

$$W_{\text{об}}(p) = \frac{0,533 \cdot (1+p)}{2,533p^3 + 5,96p^2 + 4,066p + 1} e^{-5p}, \quad \begin{bmatrix} 0 \\ \% \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Из рис. 1 видно, что найденное решение рассчитанной передаточной функции отличается от исходной кривой разгона – экспериментальных точек.

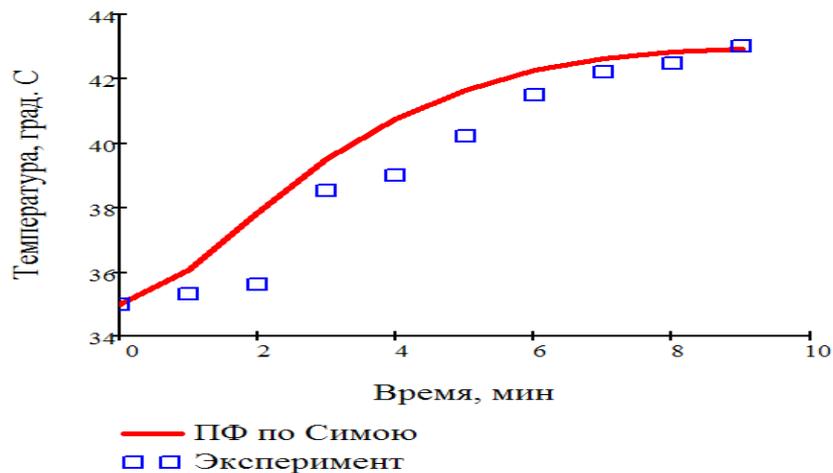


Рис.1. Кривая разгона рассчитанная по методу Симою и экспериментальная кривая разгона

Fig.1. An acceleration curve Simoyu and the experimental curve of acceleration calculated by a method

С помощью сравнения расчетных значений динамической характеристики с экспериментальными данными можно произвести оценка точности полученных коэффициентов передаточной функции, используя пакет прикладных программ MathCAD.

Задаем количество временных интервалов: $j := 0,9$

Представляем массив полученных экспериментальных данных в виде вектора:

$$sigm := sigm^T \quad (4)$$

Находим остаточную квадратичную ошибку:

$$del(a) := \sum_j (h(t, a) - sigm_j)^2.$$

$$del(a) = 12,41$$

И видим, что ее значение велико. В связи с этим предложено использовать коэффициенты передаточной функции как нулевое приближение для решения задачи минимизации квадратичной ошибки аппроксимации.

Принимаем:

$$W(p, a) = \frac{0,533 \cdot (1 + p)}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}. \quad (5)$$

Задаем начальное приближение – коэффициенты, полученные методом Симою

$$a_3 = 2,533; a_2 = 5,96; a_1 = 4,066;$$

Решаем задачу оптимизации: *Given* $a_3 > 1; a_2 > 4; a_1 > 3;$

Используя встроенную функцию Minimize, получаем оптимальные параметры передаточной функции объекта управления $Z := Minimize(del, a)$.

Оптимальные параметры передаточной функции объекта управления:

$$Z = \begin{pmatrix} 10.638 \\ 10.097 \\ 5.152 \end{pmatrix}$$

Квадратичная ошибка отклонения рассчитанной кривой разгона и экспериментальной $del(a) = 1,308$, которая существенно ниже (рис. 2).

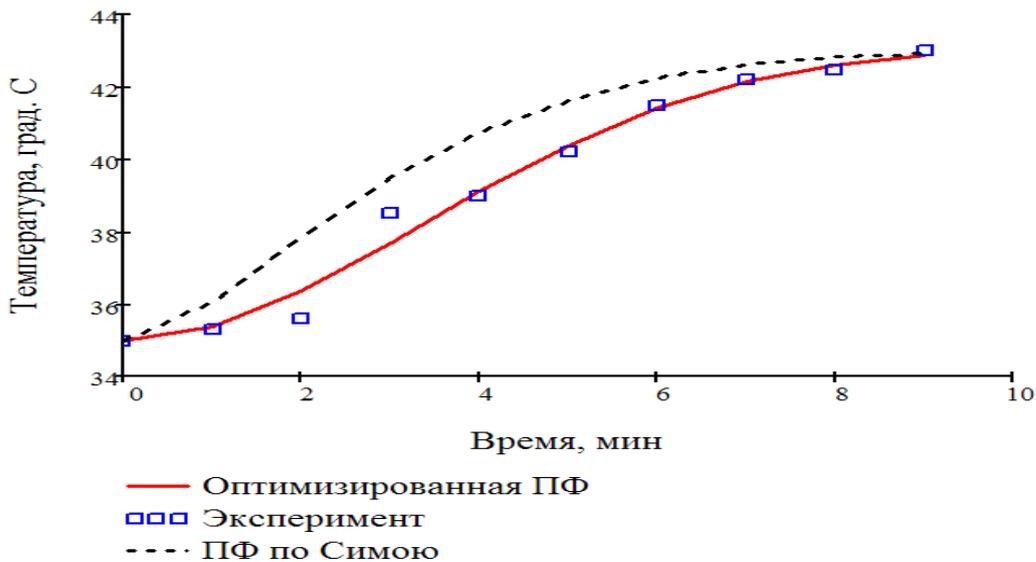


Рис. 2. Отклонение выхода модели от истинного выхода объекта

Fig. 2. A model output deviation from the true output of an object

Таким образом, передаточная функция инерциального звена примет вид:

$$W_2(p, a) = \frac{0,533 \cdot (1 + p)}{10,638p^3 + 10,097p^2 + 5,152p + 1} \quad (6)$$

Искомая математическая модель объекта управления имеет вид

$$W(p, a) = \frac{0,533 \cdot (1 + p)}{10,638p^3 + 10,097p^2 + 5,152p + 1} e^{-5p}, \quad \left[\begin{array}{c} 0 \\ C \\ \% \end{array} \right]. \quad (7)$$

Расчет системы автоматического управления включает две задачи:

- 1) Определение свойств объекта управления;
- 2) Выбор и расчет автоматического регулятора, который обеспечивает необходимое качество управления.

Соответственно, конечной целью расчета параметров настройки системы автоматического управления является получение переходных процессов в ней заданного качества.

Аналитическим методом в среде MathCad [23] определяем параметры настройки ПИ-регулятора $W_p(p) = C_1 + C_o/p$.

Определим качество регулирования для передаточных функций, используя полученные параметры настройки регулятора, полученных методом Симою и оптимизированным, рис. 3.

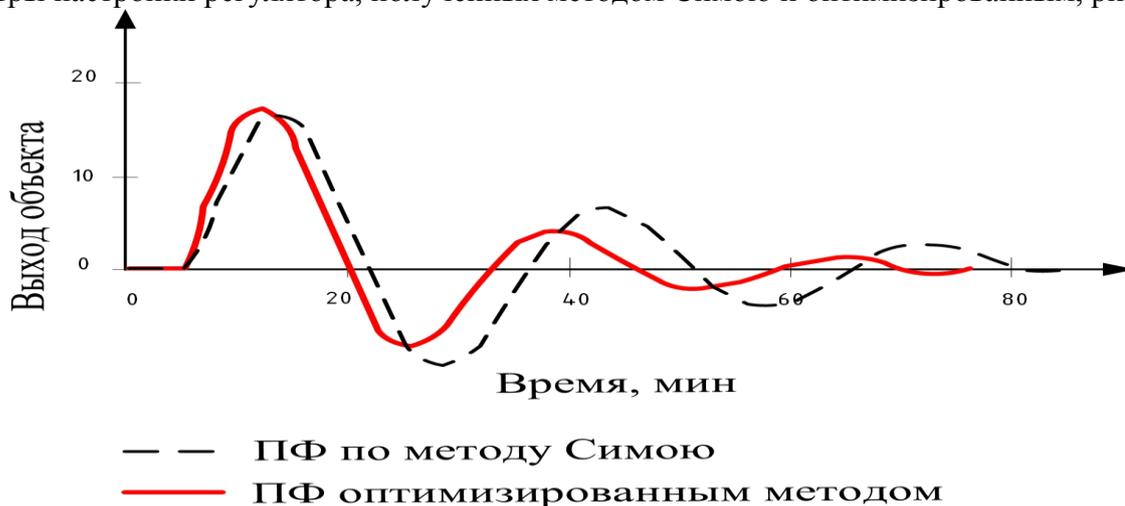


Рис. 3. Кривые переходного процесса для ПИ-регулятора
Fig. 3. Curves of transient phenomenon for the PI-regulator

Переходный процесс системы регулирования после получения параметров настройки регулятора аналитическим методом представлен на рис. 4.

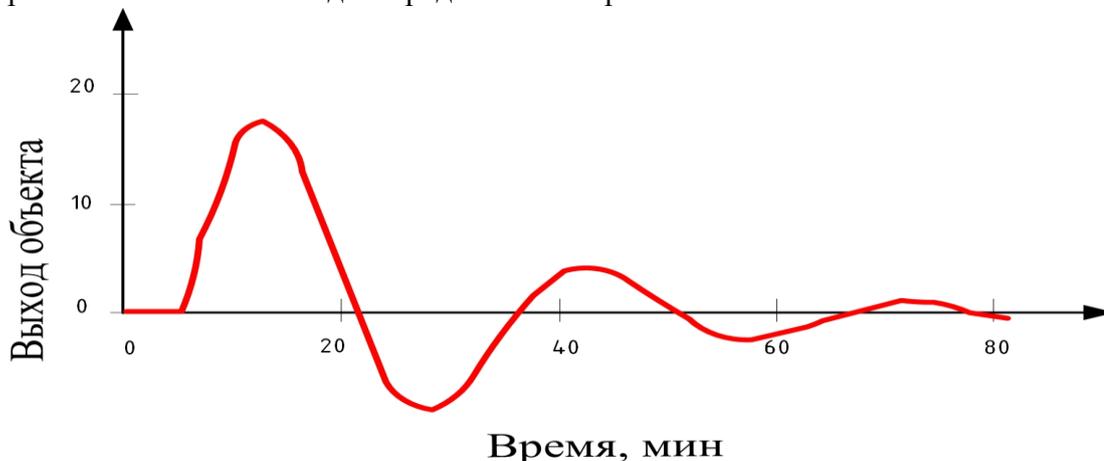


Рис. 4. Кривая переходного процесса
Fig. 4. Curve of transient phenomenon

Оценим прямые показатели качества регулирования по кривым переходного процесса, рисунки 3 и 4: t_p – время регулирования; x_{\max}^d – максимальное динамическое отклонение; λ – перерегулирование; ϕ – степень затухания переходного процесса; I_2 – интегральная ошибка (для наглядности все прямые показатели представлены в табл.1):

Таблица 1. Показатели качества регулирования
Table 1. Regulation figures of merit

Показатели	t_p , сек	x_{\max}^d	λ	ϕ	I_2
Передаточная функция по методу Симою (рис.3)	80	17,389	47,27	0,764	262,259
Оптимизированная передаточная функция (рис. 3)	100	17,668	61,517	0,611	337,648
Оптимизированная передаточная функция (рис.4)	80	17,721	48,83	0,756	299,238

Обсуждение результатов. Метод, описанный в данной работе, может быть рекомендован для практических расчетов, так как отличается простотой. Сущность метода заключается в следующем: используются два стандартных алгоритма, первый из которых предназначен для определения нулевого уровня решения задачи оптимизации – метод Симою, а второй – для оптимизации параметров передаточной функции на основании этого начального приближения (нулевого уровня решения задачи).

Данная характеристика особенно важна для использования метода при проектировании систем автоматического регулирования сложных технологических объектов в рамках систем автоматизированного проектирования, так как эти два стандартных метода позволяют быстро и точно рассчитать параметры передаточной функции, что позволяет гораздо качественнее управлять регулируемыми параметрами и более длительное время поддерживать регулируемую величину на заданном уровне.

Стоит так же отметить, что предложенный метод является работоспособным для любых алгоритмов: П, ПИ, ПИД, ПДД и т.д.

Вывод. Решена задача оптимального управления сложным технологическим комплексом. На базе модифицированного метода Симою разработан алгоритм автоматизированного выбора оптимальной формы и расчета параметров передаточных функций динамических элементов сложных ТО по кривым разгона каналов воздействия, который повышает эффективность расчета динамических характеристик объектов управления путем минимизации ошибок аппроксимации. Показана эффективность предложенного метода расчета.

Библиографический список:

1. Цыпкин Я. З. Информационная теория идентификации. - М.: Наука, 1995. – 336 с.
2. Красовский А.А. Статистическая теория переходных процессов в системах управления. - М., 1968. – 240 с.
3. Кафаров В.В., Перов В.Л., Мешалкин В.П. Принципы математического моделирования химико-технологических систем. - М.: Химия, 1974. - 344с.
4. Петров Б.Н., Бабак С.Ф., Ильясов Б.Г. и др. Об одном подходе к анализу структур многосвязных систем. - В кн.: Исследование по теории многосвязных систем / Петров Б.Н., Мееров М.В., - М.: Наука, 1982. – С. 4 – 12
5. Петров Б.Н., Уланов Г.М., Гольденблат Н.И., Ульянов С.В. Теория моделей в процессах управления – М.: Наука, 1978. - 216 с.
6. Райбман Н.С. Идентификация объектов управления (обзор) / Автоматика и телемеханика, 1979. - N 6. - С. 80 – 93
7. Месарович М. Общая теория систем / М. Месарович. – М.: Мир, 1966. – 240 с.

8. Калман Р.Е., Фалб П.Л., Арбиб М.А. Очерки по математической теории систем. - М.: Мир, 1977. – 250 с.
9. Директор С., Рорер Р. Введение в теорию систем. - М.: Мир, 1974. – 464 с.
10. Ли Э.Б., Маркус Л. Основы теории оптимального управления. - М.: Наука, 1972. – 474 с.
11. Основы автоматизации химических производств. / П.А.Обновленского, А.А.Гуревича. - М.: Химия, 1975. – 528 с.
12. Остром К., Болин Т. Цифровая идентификация динамических систем на основе данных о нормальном режиме работы / В кн.: Теория самонастраивающихся систем управления. Труды 11 Международного симпозиума ИФАК по самонастраивающимся системам. - М.: Наука, 1969. – с. 99 – 116
13. Гроп Д. Методы идентификации систем. - М.: Мир, 1979. – 302 с.
14. Калман Р.Е. Идентификация систем с шумами / Успехи математических наук. - 1985, т.40, N 4(244). - С. 27 – 41
15. Льюнг Л. О точности модели в идентификации систем / Известия АН. Техническая кибернетика. -М.: Наука, 1992. – N 6. – С. 55 – 64
16. Заде Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений / В кн.: Математика сегодня. – М.: Знание, 1974. – С. 5 – 49
17. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: в 2-х кн. / Кн.1: Пер. с англ. М.: Финансы и статистика. 1986. – 366 с.
18. Рутковский А.Л., Матвеева Л.И., Козачек Г.В. Оптимизация коэффициентов передаточной функции, полученной модифицированным методом Симою по экспериментально снятой переходной характеристике // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Т.6 – N3. – 2010. – С. 138 – 141.
19. Стефани Е.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. М-Л: Государственное энергетическое издательство, 1960. - 328с.
20. Кравцов А.Ф., Зайцева Е.В, Чуйко Ю.Н. Расчет автоматических систем контроля и регулирования металлургических процессов. Киев - Донецк: Вища шк., 1983. – 317с.
21. Симою М.П., Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев и систем авторегулирования, «Автоматика и телемеханика», т. 8, 1957, № 6С. 514–528с.
22. Arunyants G.G., Rutkovskii A.L., Salikhov Z.G., Stolbovskii D.N. Computation of Dynamic Characteristics of Control Systems An Effectiveness Enhancement Method, Automation and Control, Vol. 66, № 4, 2005, pp. 562-569
23. Очков В.Ф. Mathcad-14 для студентов и инженеров: русская версия/ В.Ф. Очков.- СПб.: БХВ – Петербург, 2009. – 498с.

References:

1. Tsypkin Ya.Z. Informatsionnaya teoriya identifikatsii. M.: Nauka; 1995. 336 s. [Tsypkin Ya.Z. Informational theory of identification. Moscow: Nauka; 1995. 336 p. (in Russ.)]
2. Krasovskiy A.A. Statisticheskaya teoriya perekhodnykh protsessov v sistemakh upravleniya. M.; 1968. 240 s. [Krasovskiy A.A. Statistical theory of transitional processes in control systems. Moscow; 1968. 240 p. (in Russ.)]
3. Kafarov V.V., Perov V.L., Meshalkin V.P. Printsipy matematicheskogo modelirovaniya khimiko-tekhnologicheskikh sistem. M.: Khimiya; 1974. 344 s. [Kafarov V.V., Perov V.L., Meshalkin V.P. The principles of mathematical modeling of chemical-technological systems. Moscow: Khimiya; 1974. 344 p. (in Russ.)]
4. Petrov B.N., Babak S.F., Il'yasov B.G. i dr. Ob odnom podkhode k analizu struktur mnogovyaznykh sistem. Issledovanie po teorii mnogovyaznykh sistem. Petrov B.N., Meerov M.V. (Eds). M.: Nauka; 1982. S. 4 – 12. [Petrov B.N., Babak S.F., Il'yasov B.G. et al. On the approach to the analysis of multi-relation system structures. Studies on the theory of multi-relation systems. Petrov B.N., Meerov M.V. (Eds). Moscow: Nauka; 1982. P. 4 – 12. (in Russ.)]
5. Petrov B.N., Ulanov G.M., Gol'denblat N.I., Ul'yasov S.V. Teoriya modeley v protsessakh upravleniya. M.: Nauka; 1978. 216 s. [Petrov B.N., Ulanov G.M., Gol'denblat N.I., Ul'yasov S.V. Model theory in control processes. Moscow: Nauka; 1978. 216 p. (in Russ.)]
6. Raybman N.S. Identifikatsiya ob"ektov upravleniya (obzor). Avtomatika i telemekhanika. 1979;6:80-93. [Raybman N.S. Identification of control objects (a review). Automation and Remote Control. 1979;6:80-93. (in Russ.)]

7. Mesarovich M. *Obshchaya teoriya sistem*. M.: Mir; 1966. 240 s. [Mesarovich M. *General systems theory*. Moscow: Mir; 1966. 240 p. (in Russ.)]
8. Kalman P.E., Falb P.L., Arbib M.A. *Ocherki po matematicheskoy teorii sistem*. M.: Mir; 1977. 250 s. [Kalman P.E., Falb P.L., Arbib M.A. *Essays on mathematical systems theory*. Moscow: Mir; 1977. 250 p. (in Russ.)]
9. Direktor S., Rorer R. *Vvedenie v teoriyu sistem*. M.: Mir; 1974. 464 s. [Direktor S., Rorer R. *Introduction in systems theory*. Moscow: Mir; 1974. 464 p. (in Russ.)]
10. Li E.B., Markus L. *Osnovy teorii optimal'nogo upravleniya*. M.: Nauka; 1972. 474 s. [Li E.B., Markus L. *Fundamentals of optimal control theory*. Moscow: Nauka; 1972. 474 p. (in Russ.)]
11. *Osnovy avtomatizatsii khimicheskikh proizvodstv*. Obnovlenskiy P.A., Gurevich A.A. (Eds.). M.: Khimiya; 1975. 528 s. [Fundamentals of chemical production automation. Obnovlenskiy P.A., Gurevich A.A. (Eds.). Moscow: Khimiya; 1975. 528 p. (in Russ.)]
12. Ostrem K., Bolin T. *Tsifrovaya identifikatsiya dinamicheskikh sistem na osnove dannykh o normal'nom rezhime raboty*. Trudy 11 Mezhdunarodnogo simpoziuma IFAK po samonastravayushchimsya sistemam "Teoriya samonastravayushchikhsya sistem upravleniya". M.: Nauka; 1969. S. 99 – 116. [Ostrem K., Bolin T. *Digital identification of dynamic systems based on the data about the normal mode of operation*. Proceedings of the 11 International symposium IFAK on the self-adaptive systems "Theory of self-adaptive control systems". Moscow: Nauka; 1969. P. 99 – 116. (in Russ.)]
13. Grop D. *Metody identifikatsii sistem*. M.: Mir; 1979. 302 s. [Grop D. *System identification methods*. Moscow: Mir; 1979. 302 p. (in Russ.)]
14. Kalman P.E. *Identifikatsiya sistem s shumami*. Uspekhi matematicheskikh nauk. 1985;40(4-244):27-41. [Kalman P.E. *Identification of systems with noises*. Russian Mathematical Surveys. 1985;40(4-244):27-41. (in Russ.)]
15. L'yunг L. *O tochnosti modeli v identifikatsii sistem*. Izvestiya AN. Tekhnicheskaya kibernetika. 1992;6:55 – 64. [L'yunг L. *On the model's accuracy for systems identification*. Engineering cybernetics. 1992;6:55 – 64. (in Russ.)]
16. Zade L.A. *Osnovy novogo podkhoda k analizu slozhnykh sistem i protsessov prinyatiya resheniy*. Matematika segodnya. M.: Znanie; 1974. S. 5 – 49. [Zade L.A. *Fundamentals of a new approach to the analysis of complex systems and decision-making processes*. Mathematics today. Moscow: Znanie; 1974. P. 5 – 49. (in Russ.)]
17. Dreyper N., Smit G. *Prikladnoy regressionnyy analiz*. M.: Finansy i statistika; 1986. 366 s. [Dreyper N., Smit G. *Applied regression analysis*. Moscow: Finansy i statistika; 1986. 366 p. (in Russ.)]
18. Rutkovskiy A.L., Matveeva L.I., Kozachek G.V. *Optimizatsiya koeffitsientov peredatochnoy funktsii, poluchennoy modifitsirovannym metodom Simoyu po eksperimental'no snyatoy perekhodnoy kharakteristike*. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2010;6(3):138 – 141. [Rutkovskiy A.L., Matveeva L.I., Kozachek G.V. *Optimisation of transfer function coefficient obtained by modified Simoyu method using experimentally derived transfer character*. The Bulletin of Voronezh State Technical University. 2010;6(3):138 – 141. (in Russ.)]
19. Stefani E.P. *Osnovy rascheta nastroyki regulyatorov teploenergeticheskikh protsessov*. M-L: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo; 1960. 328 s. [Stefani E.P. *Fundamentals of regulator adjustment of heat-energetic processes*. Moscow-Leningrad: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo; 1960. 328 p. (in Russ.)]
20. Kravtsov A.F., Zaytseva E.V, Chuyko Yu.N. *Raschet avtomaticheskikh sistem kontrolya i regulirovaniya metallurgicheskikh protsessov*. Kiev - Donetsk: Vishcha shk., 1983; 317 s. [Kravtsov A.F., Zaytseva E.V, Chuyko Yu.N. *The calculation of automatic control and regulation systems of metallurgical processes*. Kiev - Donetsk: Vishcha shk., 1983; 317 p. (in Russ.)]
21. Simoyu M.P. *Opreделение koeffitsientov peredatochnykh funktsiy linearizovannykh zven'ev i sistem avtoregulirovaniya*. Avtomatika i telemekhanika. 1957;8(6):514–528. [Simoyu M.P. *Determination of transfer function coefficients of linearised links and automatic control systems*. Automation and Remote Control. 1957;8(6):514–528. (in Russ.)]
22. Arunyants G.G., Rutkovskii A.L., Salikhov Z.G., Stolbovskii D.N. *Computation of dynamic characteristics of control systems: an effectiveness enhancement method*. Automation and Control. 2005;66(4):562-569.
23. Ochkov V.F. *Mathcad-14 dlya studentov i inzhenerov: russkaya versiya*. SPb.: BKhV – Peterburg; 2009. 498 s. [Ochkov V.F. *Mathcad-14 for students and engineers: Russian version*. Saint-Petersburg: BKhV – Peterburg; 2009. 498 p. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Рутковский Александр Леонидович – д.т.н., профессор кафедры «Теория и автоматизация металлургических процессов и печей».

Ковалева Мария Александровна – к.т.н., доцент кафедры «Теория и автоматизация металлургических процессов и печей».

Аликов Алан Юрьевич – к.т.н., профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования».

Тедеева Надя Вадимовна – аспирант кафедры «Системы автоматизированного проектирования».

Information about the authors:

Aleksandr L. Rutkovskiy - Dr. Sci.(Technical), Prof., Department of Theory and Automation of Metallurgical Processes and Furnaces.

Mariya A.Kovaleva - Cand. Sci.(Technical), Assoc. Prof., Department of Theory and Automation of Metallurgical Processes and Furnaces.

Alan Yu. Alikov - Cand. Sci.(Technical), Prof., Department of Automated Design Systems.

Nadya V. Tedeeva -Postgraduate student, Department of Automated Design Systems.

Конфликт интересов.

Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 31.05.2017.

Received 31.05.2017.

Принята в печать 19.06.2017.

Accepted for publication 19.06.2017.