

DOI 10.21603/2074-9414-2017-4-159-165
УДК 681.511.26

МЕТОДЫ СТРУКТУРНОЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЭМУЛЯТОРА ПЕЧИ ЭП10

Е. Н. Дышлюк, Р. В. Котляров*, С. Г. Пачкин

*ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт
пищевой промышленности (университет)»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47*

**e-mail: kotliarov_rv@mail.ru*

Дата поступления в редакцию: 08.11.2017

Дата принятия в печать: 11.12.2017

© Е. Н. Дышлюк, Р. В. Котляров, С. Г. Пачкин, 2017

Аннотация. Одной из основных задач, решаемых при разработке систем автоматического регулирования, является идентификация объекта управления, заключающаяся в получении его математического описания. Характер и вид математической модели определяется целями и задачами, для решения которых она будет использоваться. В рассматриваемом случае целью получения модели является синтез системы автоматического регулирования. Исходя из требований задач регулирования, задача идентификации заключается в определении структуры и параметров математической модели, обеспечивающих наилучшее сходство реакций модели и объекта на одно и то же входное воздействие. В статье рассмотрен экспериментальный метод получения математического описания объекта управления по результатам измерения его входных и выходных параметров. В качестве объекта управления выступает эмулятор ЭП10 фирмы «ОВЕН», который представляет собой миниатюрную печь. Эмулятор используется при проведении экспериментальных исследований в процессе наладочных работ с применением терморегуляторов, а также применим в учебных целях в составе учебно-исследовательских стендов. В результате структурной и параметрической идентификации получена модель объекта управления в виде апериодического звена второго порядка. Параметры математической модели позволили определить параметры настройки ПИД-регулятора TRM251. Программная реализация системы автоматического регулирования в среде MatLAB дала возможность оценить переходные процессы в замкнутой системе. Таким образом, произведен расчет системы автоматического регулирования в первом приближении. Окончательный результат можно получить на стадии ввода системы автоматического регулирования в действие на реальном объекте с применением алгоритмов адаптации.

Ключевые слова. Структурная идентификация, параметрическая идентификация, математическая модель, передаточная функция

Для цитирования: Дышлюк, Е. Н. Методы структурной и параметрической идентификации объектов управления на примере эмулятора печи ЭП10 / Е. Н. Дышлюк, Р. В. Котляров, С. Г. Пачкин // Техника и технология пищевых производств. – 2017. – Т. 47, № 4. – С. 159–165.
DOI: 10.21603/2074-9414-2017-4-159-165.

METHODS OF STRUCTURAL AND PARAMETRIC IDENTIFICATION OF CONTROL OBJECTS BASED ON THE EXAMPLE OF FURNACE EMULATOR EP10

E. N. Dyshlyuk, R. V. Kotlyarov*, S. G. Pachkin

*Kemerovo Institute of Food Science and Technology
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia*

**e-mail: kotliarov_rv@mail.ru*

Received: 08.11.2017

Accepted: 11.12.2017

© E. N. Dyshlyuk, R. V. Kotlyarov, S. G. Pachkin, 2017

Abstract. One of the main objectives met during the development of automatic control systems is the identification of the control object, which implies obtaining its mathematical description. The nature and type of the mathematical model are determined by the purposes and objectives of its use. In the given case the goal of model development is the synthesis of automatic control system. Based on the requirements of the control tasks, the aim of the identification is to determine the structure and parameters of the mathematical model that guarantee the best similarity of reactions of the model and object to the same input. The article reveals an experimental method of obtaining the mathematical description of the control object according to the results of its input and output parameters measurements. Emulator ERP10 (a mini oven) manufactured by "OWEN" company was taken as a control object. The emulator is used in the experimental research in the process of adjustment using temperature controllers. It is also used for educational purposes as a part of the educational and research exhibition stands. As a result of structural and parametric identification the authors obtained the model of the control object as an aperiodic element of the second order. The parameters of the mathematical model allowed to determine the adjustment parameters of PID controller TRM251. Software implementation of the automatic control system in MatLAB environment

allowed to assess the transient processes in a closed system. Thus, the authors calculated the values for the automatic control system in the first approximation. The final result can be obtained during the launch of the automatic control system when it works with a real object using adaptation algorithms.

Keywords. Structural identification, parametric identification, mathematical model, transfer function.

For citation: Dyshlyuk E. N., Kotlyarov R. V., Pachkin S. G. Methods of structural and parametric identification of control objects based on the example of furnace emulator EP10. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2017, vol. 47, no. 4, pp. 159–165. (In Russ.). DOI: 10.21603/2074-9414-2017-4-159-165.

Введение

Для построения автоматической системы управления технологическим процессом необходимо знать его общие свойства как объекта управления, из которых определяются условия управления. Эти свойства выявляются на основе разработки математической модели. Объект управления характеризуется определенными свойствами. Связь между установившимися значениями входа и выхода объекта определяют статические характеристики. По их форме объект управления относят к линейным или нелинейным. Поведение объекта во времени при изменении входного воздействия описывают динамические характеристики. Большинство реальных объектов характеризуется запаздыванием [7].

Теория автоматического управления, наряду с методами синтеза систем, включает методы идентификации и оценки состояния технологического процесса. На практике решение задачи идентификации с точностью, достаточной для синтеза эффективной системы автоматического регулирования, является сложной процедурой, ее выполнение осуществляется с использованием экспертных решений, принимаемых экспериментатором. Для получения приближенного решения, по которому может быть произведен расчет системы автоматического регулирования в первом приближении, в инженерной практике используются методы, рассмотренные в этой статье.

Электрические печи сопротивления широко применимы при термообработке изделий в различных отраслях промышленности: металлургия, энергетическое машиностроение, металлообработка, керамическое, стекольное производства и др. Использование автоматической системы управления термической обработкой позволяет повысить качество продукции и облегчить труд обслуживающего персонала [6]. Использование современных технических средств автоматизации и новых методов автоматического управления существенно снижает затраты на ремонт и обслуживание технологического оборудования, способствует получению экономического эффекта за счет рационального использования энергоресурсов вследствие оптимального управления технологическим процессом.

Целью данной статьи является описание применения методов структурной и параметрической идентификации при исследовании эмулятора печи ЭП10 в составе учебно-лабораторного стенда.

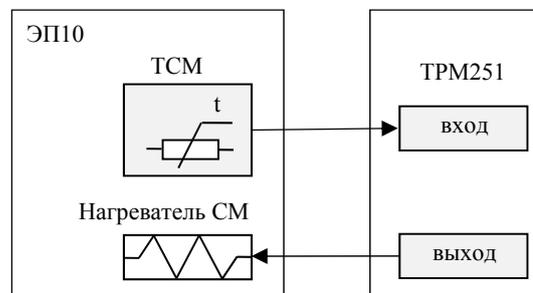
Объекты и методы исследования

На кафедре «Автоматизация производственных процессов и автоматизированных систем управления» создан учебно-лабораторный стенд на

основе эмулятора печи ЭП10 и одноканального программного ПИД-регулятора ТРМ251 фирмы «ОВЕН». Эмулятор представляет собой миниатюрную печь, нагрев которой осуществляется теплотой, выделяемой сопротивлением при прохождении по нему электрического тока. Мощность нагревателя не превышает 10 Вт. Измерение температуры производится встроенный термометр сопротивления ТСМ с градуировкой 50М. Эмулятор имеет удобный корпус с прозрачной крышкой и используется при проведении экспериментальных исследований в процессе наладочных работ с применением терморегуляторов, а также применим в учебных целях в составе учебно-исследовательских стендов.

ПИД-регулятор ТРМ251 имеет два универсальных входа, к которым подключаются наиболее распространенные типы датчиков, в том числе термометры сопротивления ТСМ. В обычном режиме регулятор осуществляет одноканальное регулирование по показаниям основного датчика. В случае отказа основного датчика происходит автоматическое включение резервного датчика. Регулятор позволяет управлять объектом с высокой точностью благодаря ПИД-регулированию. Прибор выдает значение выходной мощности, направленное на уменьшение отклонения текущего значения регулируемой величины от уставки (заданного значения). В приборе реализована функция автонастройки ПИД-регулятора. Для регулирования температуры прибор формирует на дискретном выходе ШИМ-сигнал, который поступает на нагреватель (резистор). При этом мощность нагревателя варьируется от 0 до 100 % за счет изменения продолжительности его включения [6].

Функциональная схема учебно-лабораторного стенда представлена на рис. 1.



ЭП10 – эмулятор печи; ТСМ – термометр сопротивления; ТРМ251 – ПИД-регулятор

Рисунок 1 – Функциональная схема учебно-лабораторного стенда

Figure 1 – Functional scheme of an educational and research exhibition stand EP10 – furnace emulator; RTD – resistance temperature detector; TRM251 – PID Controller

Методы теории автоматического управления позволяют описать объект исследования в простейшем случае в виде одномерного объекта, на входе которого действует переменная, характеризующая какой-либо параметр управления, а на выходе – переменная, характеризующая какой-либо показатель процесса. Проблема идентификации такого объекта в целях построения систем автоматического управления заключается в определении характеристик в виде адекватных математических моделей в рабочем диапазоне.

Современные методы идентификации используют сочетание аналитического и экспериментального методов. Это связано с тем, что чисто аналитический подход во многих случаях не обеспечивает получение математической модели, в достаточной степени соответствующей реальному объекту управления. Поэтому комбинированный подход, когда общий вид математического описания определяется аналитически, а значения коэффициентов, соответствующих конкретному объекту управления – экспериментально, является наиболее эффективным [1, 10].

На этапе структурной идентификации объекта применим аналитический подход, когда выбор структуры модели осуществляют по результатам эксперимента или иным априорным данным об объекте. При решении задач структурной идентификации, как правило, пользуются линейными моделями объекта управления в форме передаточной функции. Чаще всего выбирают модель, состоящую из последовательно включенных апериодических звеньев и звена чистого запаздывания. Причем достаточная точность решения задачи идентификации достигается при использовании одного или двух апериодических звеньев. Таким образом, передаточная функция $W(S)$, отражающая поведение объекта управления, может быть записана в виде передаточной функции апериодического звена первого порядка с запаздыванием (1), апериодического звена второго порядка (2) или апериодического звена второго порядка с запаздыванием (3).

$$W(S) = \frac{k}{T \cdot S + 1} \cdot e^{-\tau \cdot S} \quad (1)$$

$$W(S) = \frac{k}{(T_3 \cdot S + 1)(T_4 \cdot S + 1)} = \frac{k}{T_2 \cdot S^2 + T_1 \cdot S + 1} \quad (2)$$

$$W(S) = \frac{k}{(T_3 \cdot S + 1)(T_4 \cdot S + 1)} \cdot e^{-\tau \cdot S} = \frac{k}{T_2 \cdot S^2 + T_1 \cdot S + 1} \cdot e^{-\tau \cdot S} \quad (3)$$

где k – коэффициент передачи звена;
 T, T_1, T_2, T_3, T_4 – постоянные времени;
 τ – время запаздывания;
 S – переменная Лапласа.

На этапе параметрической идентификации в инженерной практике распространение получил временной метод, который сводится к экспериментальному снятию переходной

характеристики или кривой разгона. В начале эксперимента объект приводят в установившееся состояние. После этого изменяют скачкообразно входную величину на 10–15 % максимально допустимого значения входной величины. Эксперимент считается законченным, когда выходная величина достигает нового установившегося значения для объектов с самовыравниванием. При проведении эксперимента особое внимание обращают на синхронизацию регистраций входной и выходной величин. Полученную кривую обрабатывают «методом касательной», что дает возможность определения параметров передаточной функции.

Задача параметрической идентификации объекта управления заключается в определении параметров его математической модели, обеспечивающих наибольшее сходство реакций модели и объекта на одно и то же входное воздействие. Задача решается с помощью специализированных программных средств исходя из выбранного критерия подобия.

Наиболее простым критерием подобия q является модульный критерий (4):

$$q = |y(t) - Y(t)|, \quad (4)$$

где $y(t)$ – экспериментальное значение выходной переменной объекта управления;

$Y(t)$ – значение выходной переменной модели объекта управления.

Поскольку результаты эксперимента чаще всего представлены в виде массива, используют следующую запись критерия подобия (5):

$$q = \sum_{i=1}^n |y_i(t) - Y_i(t)|, \quad (5)$$

где $y_i(t)$ – экспериментальное значение выходной переменной объекта управления в i -й точке;

$Y_i(t)$ – значение выходной переменной модели объекта управления в i -й точке;

n – размерность массива экспериментальных данных.

При нормальном распределении случайной ошибки эксперимента наибольшую точность дает использование квадратичного критерия (6):

$$q = (y(t) - Y(t))^2 = \sum_{i=1}^n (y_i(t) - Y_i(t))^2, \quad (6)$$

В случае необходимости выделения значимости некоторых точек в массиве экспериментальных результатов используется взвешенный критерий (7).

$$q = \sum_{i=1}^n d_i \cdot (y_i(t) - Y_i(t))^2, \quad (7)$$

где d_i – весовой коэффициент, определяющий «вес» i -й точки.

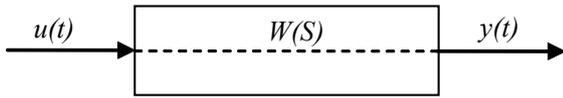
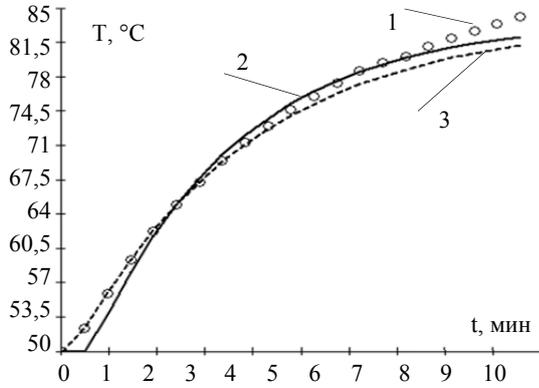


Рисунок 2 – Структурная схема одномерного объекта управления

Figure 2 – Structural configuration of one-dimension control object



1 – экспериментальные значения; 2 – кривая разгона объекта управления, описанного аperiodическим звеном первого порядка с запаздыванием; 3 – кривая разгона объекта управления, описанного аperiodическим звеном второго порядка

Рисунок 3 – Результаты параметрической идентификации объекта управления

1 – experimental values; 2 – control object transient response curve formulated as an aperiodic element of the first order with a lag; 3 – control object transient response curve formulated as an aperiodic element of the second order

Figure 3 – Results of control object parametric identification

Таблица 1 – Параметры передаточной функции объекта управления в виде аperiodического звена первого порядка с запаздыванием (1)

Table 1 – Parameters of transfer function of the control object as an aperiodic element of the first order with a lag (1)

Параметр передаточной функции	Критерий подобия		
	модульный	квадратичный	взвешенный
$k, \text{ }^\circ\text{C}/\%$	1,15		
$T, \text{ мин}$	3,12	3,21	3,23
$\tau, \text{ мин}$	0,75	0,63	0,63
Значение критерия подобия	2,63	0,11	0,12

Таблица 2 – Параметры передаточной функции объекта управления в виде аperiodического звена второго порядка (2)

Table 2 – Parameters of transfer function of the control object as an aperiodic element of the second order (2)

Параметр передаточной функции	Критерий подобия		
	модульный	квадратичный	взвешенный
$k, \text{ }^\circ\text{C}/\%$	1,15		
$T_1, \text{ мин}$	3,84	3,76	4,12
$T_2, \text{ мин}$	1,82	1,96	0,99
$T_3, \text{ мин}$	3,29	3,13	0,26
$T_4, \text{ мин}$	0,55	0,63	3,86
Значение критерия подобия	1,89	0,07	0,01

Искомые значения параметров модели объекта (постоянные времени, коэффициент передачи звена) определяются минимумом критерия подобия. Этот минимум должен быть близок к нулю, а в идеальном случае равен нулю. Т. е. задача параметрической идентификации является оптимизационной, в которой критерием оптимальности является критерий подобия объекта управления и его математической модели.

Результаты и их обсуждение

В результате анализа работы эмулятора ЭП10 сформирована его структурная схема как одномерного объекта управления (рис. 2).

В качестве входного управляющего воздействия $u(t)$ выбрана мощность (%), которую выдает ПИД-регулятор TRM251. Выходным параметром $y(t)$ является температура воздуха в «печи» ($^\circ\text{C}$).

С целью получения разгонной характеристики проведен эксперимент. Объект управления выведен в рабочую область в ручном режиме. Затем выходной параметр стабилизирован на значении $50 \text{ }^\circ\text{C}$, после чего внесено воздействие по мощности величиной 30 %. Полученный график разгонной характеристики обработан «методом касательной», что позволило получить параметры передаточных функций (1), (2) и (3).

Параметры передаточных функций уточнялись с помощью программы, реализующей методы численного решения оптимизационной задачи. Результаты уточнения представлены в табл. 1, 2 и 3. При аппроксимации разгонной характеристики объекта управления наилучший результат обеспечивает квадратичный критерий – в случае аperiodического звена первого порядка, и взвешенный критерий – в случае аperiodического звена второго порядка. Анализ результатов параметрической идентификации (табл. 2 и 3) позволяет говорить о том, что при аппроксимации порядка управления аperiodическим звеном второго порядка запаздывание отсутствует. Поэтому в качестве основных математических моделей выбраны передаточные функции (1) и (2). Кривые разгона объекта управления, описанного аperiodическими звеньями первого с запаздыванием и второго порядков, представлены на рис. 3.

Таблица 3 – Параметры передаточной функции объекта управления в виде аperiodического звена второго порядка с запаздыванием (3)

Table 3 – Parameters of transfer function of the control object as an aperiodic element of the second order with a lag (3)

Параметр передаточной функции	Критерий подобия		
	модульный	квадратичный	взвешенный
$k, \text{ }^\circ\text{C}/\%$	1,15		
$T_1, \text{ мин}$	3,83	3,80	4,08
$T_2, \text{ мин}$	1,88	1,90	0,88
$T_3, \text{ мин}$	3,25	3,20	0,23
$T_4, \text{ мин}$	0,58	0,60	3,85
$\tau, \text{ мин}$	0	0	0,03
Значение критерия подобия	1,90	0,07	0,01

В качестве основной математической модели эмулятора печи ЭП10 выбрана передаточная функция (8).

$$W(S) = \frac{1,15}{(0,26 \cdot S + 1)(3,86 \cdot S + 1)} = \frac{1,15}{0,99 \cdot S^2 + 4,12 \cdot S + 1} \quad (8)$$

Модель первого порядка дает слишком грубое приближение к рассматриваемому объекту. На кривой разгона наблюдается зона чистого запаздывания, что нехарактерно для небольших объектов управления, особенно в составе учебно-исследовательского стенда, поскольку выходной параметр после начала действия входной переменной начинает изменяться практически сразу.

Модель второго порядка точнее описывает объект управления. Зона чистого запаздывания отсутствует. Полное запаздывание определяется только емкостным запаздыванием, что более характерно для реального объекта. При этом кривая разгона достаточно точно аппроксимирует начальный участок экспериментальных данных.

По результатам идентификации объекта управления определяют его свойства [7, 8]. Исходя из полученной передаточной функции можно говорить о том, что объект обладает свойством самовывравнивания. Однако со стороны окружающей среды на него действуют возмущения. При этом стабилизация выходного параметра может занимать значительное время, за которое он хоть и стабилизируется, но может достигнуть недопустимого значения. В этом случае для оптимального протекания технологического процесса требуемый параметр необходимо регулировать.

Идентификация объекта управления является начальным этапом расчета системы автоматического регулирования [4, 9]. В частности, задача выбора закона регулирования решается на основании величины отношения времени запаздывания τ к постоянной времени объекта T (9) в соответствии со значениями табл. 1.

$$\frac{\tau}{T} = \frac{0,63}{3,21} = 0,2 \quad (9)$$

При значениях отношения $\geq 0,2$ целесообразно выбрать непрерывный регулятор. Исходя из параметров передаточной функции объекта управления могут быть определены параметры настройки автоматического регулятора [2, 5]. В общем случае передаточная функция ПИД-регулятора представлена зависимостью (10):

$$W_p(S) = k_p + \frac{1}{T_u \cdot S} + T_d \cdot S = k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{из} \cdot S} + T_{np} \cdot S \right) \quad (10)$$

где k_p – коэффициент усиления регулятора;
 T_u – время интегрирования;
 T_d – время дифференцирования;
 $T_{из}$ – время изодрома;
 T_{np} – время предварения.

Воспользуемся специальными программными средствами, которые предполагают приближенный

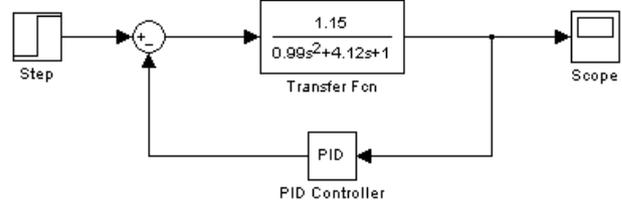
расчет регулятора, и рассчитаем параметры настройки регулятора, обеспечивающего устойчивый процесс регулирования в замкнутой системе. Результаты расчета приведены в табл. 4.

В среде MatLAB выполнена программная реализация математической модели учебно-исследовательского стенда (рис. 4), включающая модель объекта управления (Transfer Fcn) и модель регулятора (PID Controller). Получены графики процессов регулирования температуры эмулятора ЭП10 с помощью ПИД-регулятора TRM251 (рис. 5). Кривые демонстрируют реакцию системы на входное ступенчатое воздействие.

Таблица 4 – Параметры настройки ПИД-регулятора TRM251

Table 4 – Instrument settings for PID-controller TRM251

Типовой закон регулирования	Параметры настройки регулятора		
	$k_p, \%/^{\circ}\text{C}$	$T_{из}, \text{мин}$	$T_{np}, \text{мин}$
ПИ-закон	9,004	1,088	–
ПИД-закон	28,510	0,492	0,123



Step – блок задания входного ступенчатого воздействия; Transfer Fcn – аperiodическое звено второго порядка; PID Controller – ПИД-регулятор; Scope – поле графика

Рисунок 4 – Программная реализация математической модели в среде MatLAB

Step – input step function setting module; Transfer Fcn – aperiodic element of the second order; PID Controller; Scope

Figure 4 – Software mathematical model implementation in MatLAB environment

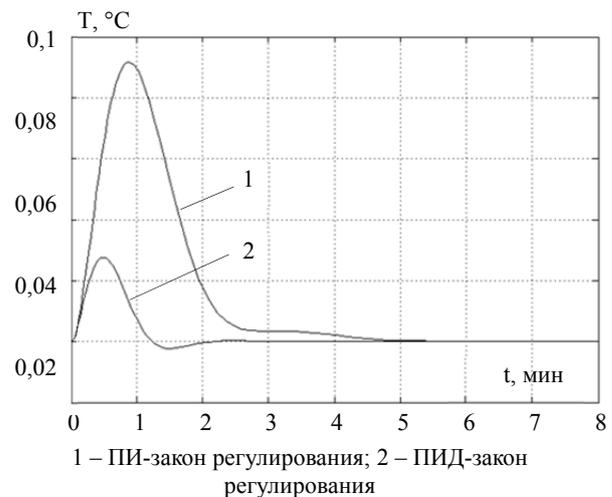


Рисунок 5 – Графики процессов регулирования температуры

Figure 5 – Thermal control process charts
 1 – PI-control law; 2 – PID-control law

Графики процессов регулирования позволяют говорить об устойчивости системы автоматического регулирования в целом. Выбор параметров настройки регулятора зависит от требований к качеству регулирования [3].

Таким образом, в статье отражены основные этапы и методы структурной и параметрической идентификации на примере реального объекта – эмультора печи ЭП10. Получены параметры

настройки ПИД-регулятора ТРМ251, позволяющие реализовать автоматическое регулирование температуры печи. Программная реализация математических моделей объекта управления и регулятора дает возможность оценить поведение замкнутой системы автоматического регулирования. С помощью известных алгоритмов адаптации могут быть получены параметры настройки регулятора для управления реальным объектом.

Список литературы

1. Генов, А. А. Идентификация состояния сложной технической системы в условиях неопределенности измерительной информации / А. А. Генов, К. Д. Русаков, С. Ш. Хиль // Программные продукты и системы. – 2017. – № 3. – С. 373–377.
2. Захарова, О. В. Новый метод формирования управляющих воздействий для ПИД-регулятора / О. В. Захарова // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 12-4. – С. 595–600.
3. Зверьков, В. П. Системы автоматического управления динамическими объектами с ПИД-регулятором в режиме нормальной эксплуатации / В. П. Зверьков, Ю. Н. Петроченко // Новое в российской электроэнергетике. – 2017. – № 4. – С. 25–36.
4. Макарова, Н. В. Анализ работы системы автоматического управления с ПИД-регулятором / Н. В. Макарова, Е. А. Немчинова, О. С. Пыресева / APRIORI. Серия: Естественные и технические науки. – 2016. – № 6. – С. 20–30.
5. Межаков, О. Г. ПИД-регулятор понижающего преобразователя напряжения / О. Г. Межаков, А. А. Скларов // Молодой ученый. – 2015. – № 10 (90). – С. 257–261.
6. Федонин, О. Н. Система автоматического управления температурой в трехзонной печи с микропроцессорным ПИД-регулятором фирмы «ОВЕН» / О. Н. Федонин, В. А. Хандожко, В. П. Матлахов // Вестник БГТУ. – 2015. – № 3. – С. 98–104.
7. Настройка параметров ПИД-закона в регуляторах температуры / Л. А. Худякова [и др.] // Вестник НТУУ «КПИ». – 2016. – № 51 (1). – С. 81–88.
8. Aslam, S. Temperature control of water-bath system in presence of constraints by using MPC / S. Aslam, S. Hannan, W. Zafar // International journal of advanced and applied sciences. – 2016. – № 12. – P. 62–68.
9. Prabhu, P. S. Design and development of two degree of freedom model with PID controller for turning operation / P. S. Prabhu, R. Prathipa, B. Shanmugasundaram // Journal of measurements in engineering. – 2016. – № 4. – P. 224–231.
10. Zhang, X. X. Identification of time delay in nonlinear systems with delayed feedback control / X. X. Zhang, J. Xu // Journal of the Franklin institute-engineering and applied mathematics. – 2015. – № 8. – P. 2987–2998.

References

1. Genov A. A., Rusakov K. D., Hill S. S. Identifikatsiya sostoyaniya slozhnoy tekhnicheskoy sistemy v usloviyakh neopredelennosti izmeritel'noy informatsii [Identification of a Complex Technical System Functional State under Conditions of Measurement Data Ambiguity]. *Programmnyye produkty i sistemy* [Software & Systems], 2017, no. 3, pp. 373–377.
2. Zakharova O. V. Novyy metod formirovaniya upravlyayushchikh vozdektviy dlya PID regulyatora [New Method of Formation of Control Actions for PID Controller]. *Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii* [Modern High Technologies], 2015, no. 12-4, pp. 595–600.
3. Zver'kov V. P., Petrochenko Yu. N. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dinamicheskimi ob'ektami s PID-regulyatorom v rezhime normal'noy ekspluatatsii [Dynamic Objects Automatic Control Systems with PID-regulator at Normal Operation Mode]. *Novoe v rossiyskoy elektroenergetike* [New in the Russian Power Industry], 2017, no. 4, pp. 25–36.
4. Makarova N. V., Nemchinova E. A., Pyreseva O. S. Analiz raboty sistemy avtomaticheskogo upravleniya s PID-regulyatorom [Analysis of the Automatic Control System with PID Controller]. *APRIORI. Estestvennyye i tekhnicheskkiye nauki* [APRIORI. Natural and Technical Sciences], 2016, no. 6, p. 20.
5. Mezhaikov O. G., Sklyarov A. A. PID-regulyator ponizhayushchego preobrazovatelya napryazheniya [PID-regulator of the Lowering Voltage Converter]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2015, no. 10(90), pp. 257–261.
6. Fedonin O. N., Handozhko V. A., Matlakhov V. P. Sistema avtomaticheskogo upravleniya temperaturoy v trekhzonnoy pechy s mikroprocessornym PID-regulyatorom firmy «OWEN» [Automatic Three-zone Temperature Control Furnace Microprocessor PID Controller Company «OWEN»]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Bryansk State Technical University], 2015, no. 3, pp. 98–104.
7. Hudyakova L. A., Shovenyuk Yu. V., Stashkevich V. F., Kulakhmetov D. R. Nastroyka parametrov PID-zakona v regulyatorakh temperatury [PID Temperature Regulator Parameters Adjustment]. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy "Kievskiy politekhnicheskyy institut"* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnical Institute"], 2016, no. 51(1), pp. 81–88.
8. Aslam S., Hannan S., Zafar W. Temperature Control of Water-bath System in Presence of Constraints by Using MPC. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 2016, no. 12, pp. 62–68.
9. Prabhu P. S., Prathipa R. Design and Development of Two Degree of Freedom Model with PID Controller for Turning Operation. *Journal of Measurements in Engineering*, 2016, no. 4, pp. 224–231.
10. Zhang X. X., Xu J. Identification of Time Delay in Nonlinear Systems with Delayed Feedback Control. *Journal of the Franklin Institute-engineering and Applied Mathematics*, 2015, no. 8, pp. 2987–2998.

Дышлюк Евгений Николаевич

студент кафедры автоматизация производственных процессов и автоматизированные системы управления, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47

Котляров Роман Витальевич

канд. техн. наук, заведующий кафедрой автоматизация производственных процессов и автоматизированные системы управления, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47, тел.: +7 (3842) 39-68-35, e-mail: asu@kemtipp.ru

Пачкин Сергей Геннадьевич

канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизация производственных процессов и автоматизированные системы управления, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47, тел.: +7 (3842) 39-68-35, e-mail: asu@kemtipp.ru

Evgenij N. Dyshlyuk

Student of the Department of Automation of manufacturing processes and computer-aided control systems, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia

Roman V. Kotlyarov

Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Automation of manufacturing processes and computer-aided control systems, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-35, e-mail: asu@kemtipp.ru

Sergej G. Pachkin

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation of manufacturing processes and computer-aided control systems, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-35, e-mail: asu@kemtipp.ru

