

ИНФОРМАТИКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ COMPUTER SCIENCE AND ENGINEERING SCIENCES

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ MODELLING OF PROCESSES AND MANAGEMENT IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 681.53

Д. А. Гринюк, Н. М. Олиферович, И. Г. Сухорукова, И. О. Оробей
Белорусский государственный технологический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАСТРОЙКА СИСТЕМ С НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКОЙ

В статье рассматривается проблематика анализа нелинейных объектов управления. Изучен класс объектов, которые в диапазоне возможного регулирования имеют известную зависимость динамики от выходного параметра. Приведены примеры таких объектов и предложена структура для их моделирования.

Проведенное имитационное моделирование объекта управления второго порядка с линейной зависимостью постоянной времени от выходного параметра продемонстрировало асимметрию получаемых передаточных функций по каналу регулирования и высокую зависимость от диапазона исследования. При этом при увеличении в одном направлении наблюдается наличие доминирующей постоянной времени, тогда как в противоположном – минимизация среднеквадратического отклонения приводит к передаточным функциям второго порядка с равными значениями постоянной времени. И даже при этом величина среднеквадратического отклонения аппроксимации имеет худшее значение, чем в первом случае.

Для исследованного примера произведена настройка контура управления из ранее полученных передаточных функций объекта. Для настройки разных вариантов использован один и тот же интегральный критерий на предложенной нелинейной структуре. Анализ переходных процессов показал разное качество при изменении направления сигнала задания. Из этого делается вывод, что рационально иметь набор настроек регулирования и при изменении направления воздействия менять параметры. В расширенном варианте можно менять настройки не только при изменении знака, но и координаты, как это уже используется в табличном управлении промышленных систем.

Разработанный вариант анализа представляет собой промежуточный вариант между линеаризацией нелинейных объектов управления и использованием решения уравнений в частных производных.

Ключевые слова: нелинейная динамика, настройка регулятора, переходный процесс.

Для цитирования: Гринюк Д. А., Олиферович Н. М., Сухорукова И. Г., Оробей И. О. Моделирование и настройка систем с нелинейной динамикой // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2021. № 2 (248). С. 65–71.

D. A. Hryniuk, N. M. Oliferovich, I. G. Suhorukova, I. O. Orobei
Belarusian State Technological University

MODELING AND TUNING CONTROL OBJECTS WITH NONLINEAR DYNAMICS

The article deals with the problems of analysis of nonlinear control objects. A class of objects, which in the range of possible regulation have a known dependence of the dynamics on the output parameter, is studied. Examples of such objects are given and a structure for their modeling is proposed.

The carried out simulation modeling of a second-order control object with a linear dependence of the time constant on the output parameter demonstrated the asymmetry of the obtained transfer functions along the control channel and a high dependence on the range of the study. At the same time, with an increase in one direction, the presence of a dominant time constant is observed, while in the opposite direction, the minimization of the root-mean-square deviation leads to second-order transfer functions with equal values of the time constant. And even so, the value of the standard deviation of the approximation has a worse value than in the first case.

For the investigated example, the control loop was tuned from the previously obtained transfer functions of the object. To adjust different options, the same integral criterion was used on the proposed nonlinear structure. Transient analysis showed different quality when changing the direction of the task signal. From this, it is concluded that it is rational to have a set of control settings, and change the parameters when changing the direction of exposure. In the extended version, you can change the settings not only when changing the sign, but also the coordinates, as is already used in the table management of industrial systems.

The developed version of the analysis is an intermediate version between the linearization of nonlinear control objects and the use of solving partial differential equations.

Key words: nonlinear dynamics, regulator tuning, transient process.

For citation: Hryniuk D. A., Oliferovich N. M., Suhorukova I. G., Orobei I. O. Modeling and tuning control objects with nonlinear dynamics. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2021, no. 2 (248), pp. 65–71 (In Russian).

Введение. Проявление нелинейных свойств характерно для всех объектов управления технологическими процессами [1–3]. Для проведения процедуры настройки регуляторов обычно предварительно проводят линеаризацию. При этом выбор метода линеаризации зависит от задач и свойств объекта [4–5]. После получения линейной модели производится процедура настройки параметров регулятора. Возможность такого варианта обусловлена тем, что функционирование технологического процесса происходит в небольшом диапазоне изменения параметров.

Иногда из-за нелинейных особенностей объекта управления такой подход не срабатывает. Качество переходного процесса может оказаться неудовлетворительным, и система может стать неустойчивой. Тогда используют различные подходы перенастройки систем регулирования, применяют нелинейное управление [6–8]. Здесь выбирают как нечеткие, нейронные, гибридные подходы, так и различные варианты математического моделирования с формированием целевой функции и поиском ее экстремума [8].

Ряд технологических объектов имеет динамику, зависящую от параметра, который непосредственно регулируется [1–2]. К таким объектам можно отнести, например, стабилизацию уровня L . Постоянная времени обычно определяется как

$$T = \frac{LS}{F}, \quad (1)$$

где S – площадь сосуда, танка; F – расход.

Как следствие, при значительных колебаниях уровня будет наблюдаться и изменение постоянной времени. Это происходит, когда уровень, например, является вспомогательным контуром каскадной системы управления.

Такая же ситуация наблюдается и при тепловых процессах. Одним из вариантов определения постоянной времени является формула.

$$T = \frac{WC}{Q} (\theta - \theta_1), \quad (2)$$

где W – масса теплообменной стенки; C – теплоемкость; Q – количество тепла, которое участвует в теплообмене; θ – температура теплоносителя; θ_1 – температура стенки.

Такие же особенности могут наблюдаться при стабилизации скорости при движении в вертикальном направлении во время управления летательными аппаратами и в прочих динамических системах [7].

Данную проблему можно наблюдать в классе задач управления объектов с распределенными параметрами. Однако разработанные подходы построения систем управления такими

объектами часто сложны и не оправданы в решении частных задач. В статье предлагается упрощенная процедура учета свойств реальных объектов.

Оценка динамических свойств объектов с переменной динамикой. При исследовании объектов с динамикой, которая зависит от выходного параметра, можно воспользоваться как различными методами анализа нелинейных систем, так и математическим моделированием.

Зависимость постоянных времени от параметра управления не всегда линейна, как следует из формул (1)–(2), но в нашем математическом эксперименте примем такое допущение.

Смоделируем работу процесса экспериментальной оценки динамики канала управления для нескольких вариантов. Примем, что объект управления имеет второй порядок. Каждую из постоянных времени TV_1 и TV_2 будем моделировать с помощью структуры, представленной на рис. 1.

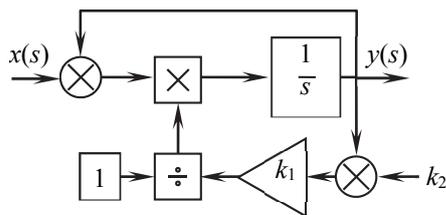


Рис. 1. Структура для моделирования динамики объекта, которая зависит от выходного параметра: $x(s)$ – вход; $y(s)$ – выход; k_1, k_2 – коэффициенты настройки диапазона изменения постоянной времени

Коэффициент k_2 , в первую очередь, определяет начальное значение постоянной времени; k_1 – диапазон изменения. В случае, если подобную структуру сформировать в обратную связь, то будет происходить и изменение коэффициента усиления. Предложенная структура позволяет иметь линейную зависимость постоянной времени от выходного параметра.

Для оценки влияния нелинейной динамики на процесс идентификации было проведено моделирование объектов и выполнена идентификация эквивалентной передаточной функции с постоянными коэффициентами. В процессе моделирования формировались переходные процессы, как показано на рис. 2, а, б.

Идентификация производилась путем аппроксимации тренда переходным процессом звена второго порядка с постоянными значениями TC_1 и TC_2 и минимизацией среднеквадратичного отклонения. Коэффициенты получались отдельно, для каждого из тактов I–IV (рис. 2, а). Для выбранных вариантов оценивалось

интегральное значение среднеквадратичного отклонения (ISD). Чтобы облегчить анализ, для каждого из вариантов определялось относительное отклонение RISD по отношению к минимальному значению ISD. Результаты представлены в табл. 1–6. В табл. 1–3 дана оценка влияния большей постоянной времени. В табл. 4–6 показано изменение чувствительности по малой постоянной времени.

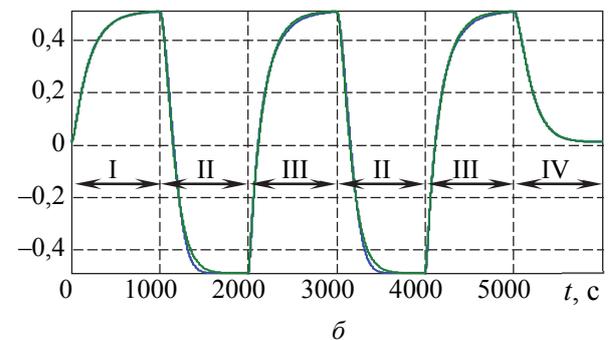
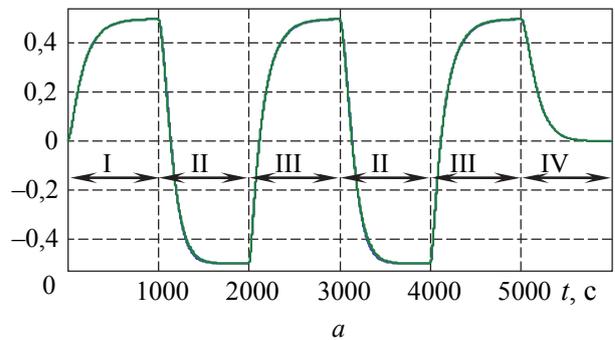


Рис. 2. Переходной процесс для объекта второго порядка с переменной динамикой и результат его аппроксимации: а – при $TV_1 = 80–160$ и $TV_2 = 30–50$; б – $TV_1 = 60–200$ и $TV_2 = 30–50$

Таблица 1

Идентификация при $TV_1 = 80–160$ и $TV_2 = 30–50$

Параметры	Номер интервала идентификации			
	I	II	III	IV
TC_1	31,02	80,69	14,98	120,2
TC_2	153,5	80,69	143,6	64,38
RISD	2,34	857	107,2	1

Таблица 2

Идентификация при $TV_1 = 60–200$ и $TV_2 = 30–50$

Параметры	Номер интервала идентификации			
	I	II	III	IV
TC_1	25,62	86,76	5,351	136,1
TC_2	182,8	86,72	160,6	73,14
RISD	1,251	226,5	41,74	1

Таблица 3
Идентификация при $TV_1 = 100-120$
и $TV_2 = 30-50$

Параметры	Номер интервала идентификации			
	I	II	III	IV
TC_1	38,72	94,50	28,99	107,4
TC_2	121,5	54,92	121,3	52,23
RISD	1	29,4613	10,4631	1,3988

Таблица 4
Идентификация при $TV_1 = 80-160$
и $TV_2 = 35-45$

Параметры	Номер интервала идентификации			
	I	II	III	IV
TC_1	151,9	80,73	16,44	123,0
TC_2	29,91	80,72	141,9	59,36
RISD	1,7065	212,9412	43,6120	1

Таблица 5
Идентификация при $TV_1 = 80-160$
и $TV_2 = 15-65$

Параметры	Номер интервала идентификации			
	I	II	III	IV
TC_1	33,74	80,51	10,54	86,96
TC_2	158,9	80,50	148,5	104,4
RISD	1	973,1861	36,0148	5,9460

Таблица 6
Идентификация при $TV_1 = 100-120$
и $TV_2 = 15-65$

Параметры	Номер интервала идентификации			
	I	II	III	IV
TC_1	127,0	84,63	127,6	97,77
TC_2	41,18	63,88	23,35	68,83
RISD	1	34,87	10,37	1,730

Хуже всего аппроксимировались результаты при несовпадении направления воздействия на объект и градиента зависимости динамики (II). В этом случае для улучшения аппроксимации необходимо увеличивать порядок передаточной функции.

Интегральное значение среднеквадратичного отклонения (СКО) отличалось от диапазона и направления отклонения (табл. 7). Чем меньше отклонение, тем лучше качество аппроксимации. Полученные результаты хорошо коррелируются с результатами прикладных экспериментов с тепловыми объектами [10, 11].

Особенности настройки объектов с переменной динамикой. Настройку систем управления для объектов с переменной динамикой можно производить из разных позиций. Самым простым является нахождение таких настроек, при которых система будет устойчива и обеспечит приемлемое качество управления в диапазоне изменяющейся динамики. Исходя из

полученных результатов, видим, что подход хорош при небольшом диапазоне отклонений выходной величины. В противоположном случае встает более сложный вопрос, так как динамика вверх и вниз может иметь существенные отличия.

Таблица 7
Минимальное значение СКО

Эксперимент	Минимальное значение ISD
$TV_1 = 80-160$ и $TV_2 = 30-50$	0,000220
$TV_1 = 60-200$ и $TV_2 = 30-50$	0,00447
$TV_1 = 100-120$ и $TV_2 = 30-50$	0,000269
$TV_1 = 80-160$ и $TV_2 = 35-45$	0,000219
$TV_1 = 80-160$ и $TV_2 = 15-65$	0,000326
$TV_1 = 100-120$ и $TV_2 = 15-65$	0,000272

В качестве примера был выбран вариант, при котором $TV_1 = 80-160$ и $TV_2 = 30-50$. Настройка проводилась для нелинейной модели в том же диапазоне изменения выходной величины, что и при идентификации по интегральному критерию [12-14]:

$$\int_0^{\infty} t^2 |e(t)| dt \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $e(t) = (SP - y)$ – сигнал ошибки между сигналом задания и выходным сигналом; t – время.

Структура системы представляла собой такой же объект, как при идентификации, но с датчиком в обратной связи (рис. 3).

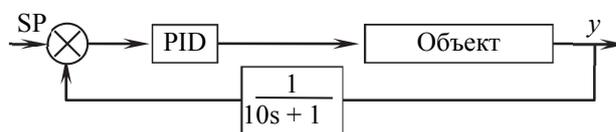


Рис. 3. Структура системы

Кроме настроек, которые были найдены путем минимизации критерия на всем диапазоне с использованием структуры (рис. 1), осуществлен поиск настроек для передаточных функций, которые определены в результате идентификации (табл. 8):

$$W = \frac{1}{(80,69s + 1)(80,69s + 1)}; \quad (4)$$

$$W = \frac{1}{(14,98s + 1)(143,6s + 1)}. \quad (5)$$

Таблица 8
Результаты настройки для разных вариантов

Объект	k_p	t_i	t_d
5	6,7507	23,9011	106,4977
4	14,4137	11,2619	587,8606
Универсальные настройки	2,6662	58,0469	60,0686

Универсальные настройки дают разный вид переходного процесса. При увеличении сигнала задания наблюдаются затухающие колебания, при уменьшении – медленный аperiодический переходной процесс. Переходной процесс при универсальных настройках представлен на рис. 4.

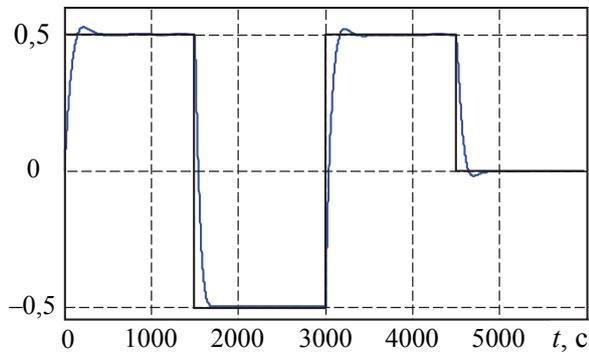


Рис. 4. Переходной процесс для объекта второго порядка с переменной динамикой и результат его аппроксимации при $TV_1 = 80-160$ и $TV_2 = 30-50$

Для сравнения было произведено моделирование, при котором в качестве объекта брались передаточные функции, которые получены при идентификации (4) и (5), рис. 5.

Результаты моделирования показывают, что использование аппроксимации нелинейной системы линейными моделями не дает инструмента по прогнозированию поведения объекта с переменной динамикой. Результат поведения системы, скорее всего, является чем-то средним в части основных качеств переходных процессов.

Для выбранного объекта управления можно было предложить структуру с переменными настройками ПИД-регулятора в зависимости от сигнала задания, если основные возмущения идут по этому каналу. Если отклонения от стационарного состояния происходят по причине возмущений, то в качестве изменений настроек могут выступать показания измерительного преобразователя выходного параметра. Все это можно объединить в вариант табличного управления, который широко используется в промышленных вариантах.

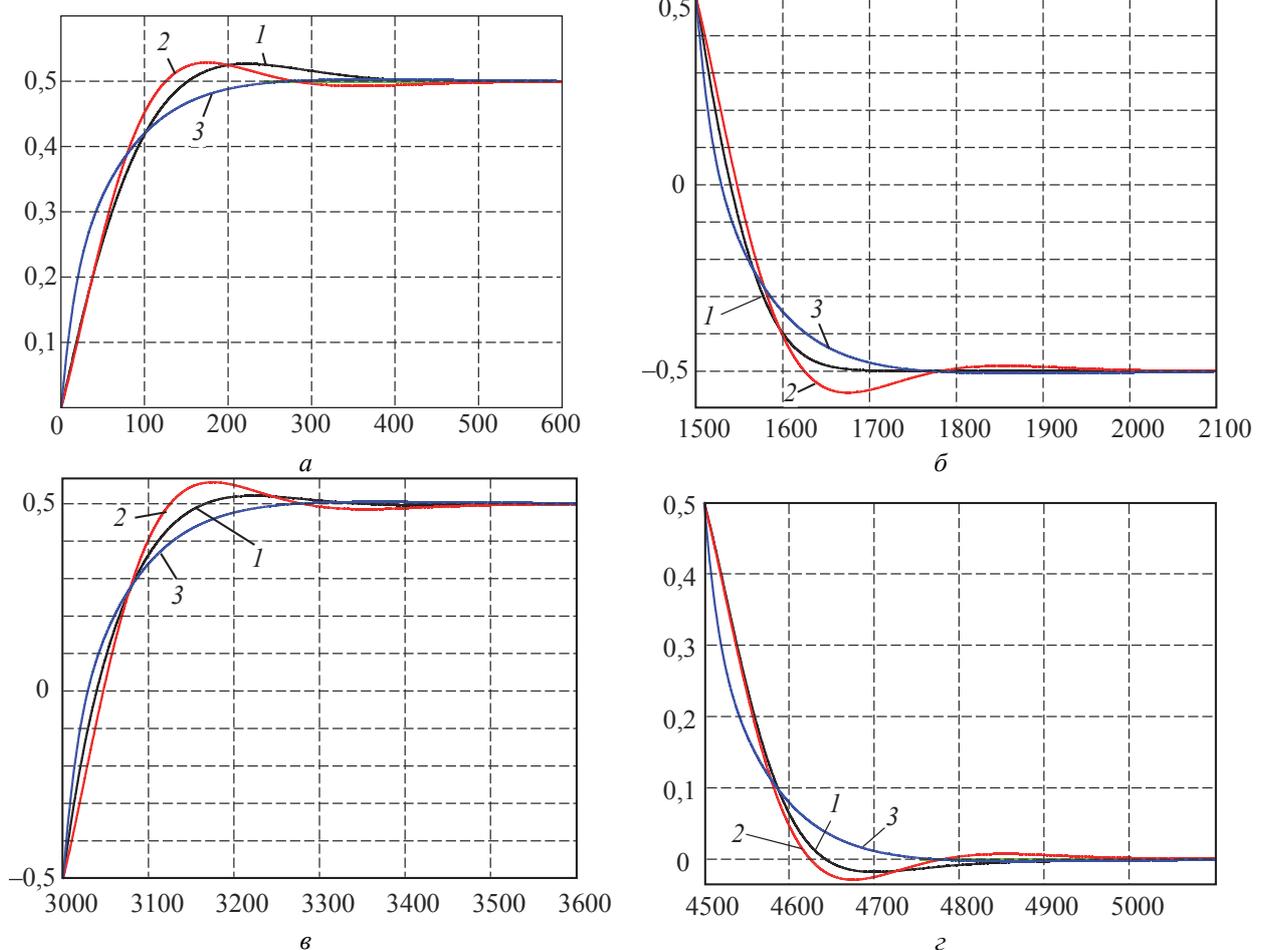


Рис. 5. Переходной процесс на тактах:
 а – I; б – II; в – III; г – IV;
 1 – при универсальных настройках на объекте с переменной динамикой (1);
 2 – при модели объекта (4); 3 – модели (5)

Выбранный вариант анализа нелинейных объектов не учитывает всех аспектов. С другой стороны, применение уравнений в частных производных позволяет получить более качественный анализ. Предложенный механизм анализа является некоторым промежуточным вариантом между линеаризацией и уравнениями в частных производных. Однако возможность имитационного моделирования в современных математических пакетах позволяет произвести анализ широкого класса задач объектов с переменной динамикой.

Заключение. 1. Для выбора подхода к настройке системы управления объектами с нелинейной

динамикой следует производить оценку возможных изменений параметров.

2. При широком изменении постоянных времени объекта управления поиск настроек следует производить с учетом нелинейных свойств.

3. Оценка результатов настройки ПИД-регулятора для данного типа объектов на аппроксимированных моделях является достаточно косвенной.

4. Экспериментальное определение модели объектов с переменной динамикой следует выполнять с учетом присутствия асимметрии.

5. Для обеспечения качества поддержания параметров лучше использовать регуляторы с изменяющимися характеристиками.

Список литературы

1. Hangos K.M., Cameron I.T. Process modelling and model analysis. San Diego: Academic Press, 2001. 543 p.
2. Smedsrud H. Dynamic model and control of heat exchanger networks // 5th year project work. Norwegian University of Science and Technology. Department of Chemical Engineering, 2007. 50 p.
3. Dorfman K. D., Prodromos D. Numerical Methods with Chemical Engineering Applications. Cambridge University Press, 2017. 511 p.
4. Bequette B. W. Process Control: Modeling, Design and Simulation. Upper Saddle River, N. J.: Prentice Hall PTR, 1998. 621 p.
5. Mikles J., Fikar M. Process Modelling, Identification, and Control. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 497 p.
6. Boufadene M. Nonlinear Control Systems Using MATLAB / CRC Press. Taylor & Francis Group, 2018. 58 p.
7. Vepa R. Nonlinear Control of Robots and Unmanned Aerial Vehicles An Integrated Approach / CRC Press. Taylor & Francis Group, 2016. 544 p.
8. Baldea M., Daoutidis P. Dynamics and Nonlinear Control of Integrated Process Systems. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 257 p.
9. Lisauskas S., Udris D., Uznys D. Direct Torque Control of Induction Drive Using Fuzzy Controller // Elektronika ir Elektrotechnika. 2013. Vol. 19 (5). P. 13–16.
10. Marozava M., Hryniuk D. Experimental study of the variation dynamic's for air heat exchanger // Mokslas – Lietuvos ateitis / Science – Future of Lithuania. 2017. Vol. 9, no. 3. P. 297–301.
11. Оценка динамики изменения температуры по длине металлического стержня / Д. А. Гринюк [и др.] // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф., 27 марта 2018 г. Вологда: ВоГУ, 2018. С.85–88.
12. Hryniuk D., Suhorukova I., Oliferovich N., Orobei I. Complex tuning of the PID controller according to integral criteria // Open Conference Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream). Vilnius, 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/eStream.2018.8394117.
13. Hryniuk D., Suhorukova I., Orobei I. Non-linear PID controller and methods of its setting // Open Conference Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream). Vilnius, 2017. P. 1–4. DOI: 10.1109/eStream.2017.7950327.
14. Сухорукова И. Г., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Применение в ПИД-законе регулирования нелинейных функций преобразования ошибки // Труды БГТУ. 2013. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 95–98.

References

1. Hangos K.M., Cameron I.T. Process modelling and model analysis. San Diego, Academic Press Publ., 2001. 543 p.
2. Smedsrud H. Dynamic model and control of heat exchanger networks. 5th year project work. Norwegian University of Science and Technology. Department of Chemical Engineering Publ., 2007. 50 p.
3. Dorfman K. D., Prodromos D. Numerical Methods with Chemical Engineering Applications. Cambridge University Press Publ., 2017. 511 p.

4. Bequette B. W. Process Control: Modeling, Design and Simulation. Upper Saddle River, N. J., Prentice Hall PTR Publ., 1998. 621 p.
5. Mikles J., Fikar M. Process Modelling, Identification, and Control. Springer-Verlag Berlin Heidelberg Publ., 2007. 497 p.
6. Boufadene M. Nonlinear Control Systems Using MATLAB. CRC Press. Taylor & Francis Group Publ., 2018. 58 p.
7. Vepa R. Nonlinear Control of Robots and Unmanned Aerial Vehicles An Integrated Approach. CRC Press. Taylor & Francis Group Publ., 2016. 544 p.
8. Baldea M., Daoutidis P. Dynamics and Nonlinear Control of Integrated Process Systems. Cambridge, Cambridge University Press Publ., 2012, pp. 2012–257.
9. Lisauskas, S., Udrys, D. and Uznyš, D. Direct Torque Control of Induction Drive Using Fuzzy Controller. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 2013, vol. 19 (5), pp. 13–16.
10. M. Marozava, D. Hryniuk. Experimental study of the variation dynamic's for air heat exchanger. Mokslas – Lietuvos ateitis. *Science – Future of Lithuania*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 297–301.
11. Hryniuk D. A. Suhorukova I. G., Olyferovich N. M., Stabljetskiy V. A. Assessment of the dynamics of temperature changes along the length of the metal rod. *Avtomatizatsiya i energosberezheniye mashinostroitel'nogo i metallurgicheskogo proizvodstv, tekhnologiya i nadezhnost' mashin, priborov i oborudovaniya: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Automation and energy saving of machine-building and metallurgical industries, technology and reliability of machines, instruments and equipment: materials of the XIII International Scientific and Technical Conference]. Vologda, 2018, pp. 85–88 (In Russian).
12. Hryniuk D., Suhorukova I., Olyferovich N., Orobei I. Complex tuning of the PID controller according to integral criteria. *Open Conference Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*. Vilnius, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/eStream.2018.8394117.
13. Hryniuk D., Suhorukova I., Orobei I. Non-linear PID controller and methods of its setting. *Open Conference Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*. Vilnius, 2017, pp. 1–4. DOI: 10.1109/eStream.2017.7950327.
14. Suhorukova I. G., Hryniuk D. A., Orobei I. O. Application of non-linear error conversion functions in the PID law. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 95–98 (In Russian).

Информация об авторах

Гринюк Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: hryniuk@tut.by

Олиферович Надежда Михайловна – ассистент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: olyferovich@belstu.by

Сухорукова Ирина Геннадьевна – старший преподаватель кафедры программной инженерии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: irina_x@rambler.ru

Оробей Игорь Олегович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: orobei@tut.

Information about the authors

Hryniuk Dzmitry Anatol'yevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hryniuk@tut.by

Olyferovich Nadezhda Mikhaylovna – Assistant Lecturer, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: olyferovich@belstu.by

Suhorukova Irina Gennad'yevna – Senior Lecturer, the Department of Software Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina_x@rambler.ru

Orobei Igor Olegovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: orobei@tut.by

Поступила после доработки 15.06.2021