

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 681.53

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

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КРИТЕРИЕВ

В статье рассматриваются различные варианты настройки ПИД-алгоритма для одновременного решения задачи компенсации отклонений по сигналам задания и возмущения. Исследованы различные варианты конструкции регуляторов с двумя степенями свободы (of the two-degree-of-freedom structure, 2DoF). Для объекта управления с несколькими вариантами динамики произведен анализ как известной структуры регулятора с двумя степенями свободы, так и собственный вариант. Также были разработаны и рассмотрены варианты построения нелинейного ПИД-регулятора с двумя степенями свободы. В качестве основы настройки и последующего сравнения линейных и нелинейных вариантов 2DoF-регуляторов использованы два варианта интегральных критериев. Показано, что два варианта структур с двумя степенями свободы улучшают работу ПИД-регулятора, но не являются эквивалентными и не обеспечивают одновременной минимизации интегральных критериев возмущения и заданного значения. Сделан вывод, что при выборе структур для решения прикладных задач, следует обладать априорной информацией об амплитуде и интенсивности основных возмущений, которые будут воздействовать на объект управления. Среди использованных для комплексной настройки интегральных критериев модифицированный интегральный критерий приводит к более приемлемому для технологических объектов переходному процессу.

Обнаружено меньшее расхождение между работами двух нелинейных структур 2DoF. Для рассмотренных вариантов динамики объекта управления с точки зрения интегральных критериев нелинейная структура лучше справлялась с подавлением возможных отклонений.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, регулятор с двумя степенями свободы, нелинейный регулятор, интегральные критерии настройки.

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

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF PID CONTROLLER WITH TWO-DEGREE-OF-FREEDOM STRUCTURE WITH INTEGRATED CRITERIA

The article considers various options for configuring the PID algorithm for simultaneous solution of the problem of compensation of deviations from the reference and disturbance signals. Different variants of the controller with two-degree-of-freedom structure (2DoF) are investigated. For a control object with several variants of dynamics, analysis of both the known structure of a controller with two degrees of freedom, so its own version, is performed. Also options for constructing a nonlinear PID controller with two degrees of freedom were developed and considered. Two variants of integral criteria are used as a basis for tuning and subsequent comparison of linear and nonlinear variants of 2DoF controllers. It is shown that two versions of structures with two degrees of freedom improve the operation of the PID controller, but are not equivalent and don't provide simultaneous minimization of integral disturbance criteria and a given value. It is concluded that when choosing the structures for solving applied problems, it is necessary to have a priori information about the amplitude and intensity of the main disturbances that will affect the control object. Among the integral criteria used for complex turning, the modified integral criterion leads to a more transient process that is more acceptable for technological processes.

A smaller discrepancy is found between the work of two nonlinear 2DoF structures. For the considered variants of the dynamics of the control object, from the point of view of integral criteria, the nonlinear structure copes better with suppression of possible deviations.

Key words: PID controller, controller with two-degree-of-freedom structure, non-linear PID, integral performance criteria.

Введение. Качественная настройка промышленных регуляторов способствует повышению стабильности технологических параметров и уменьшает энергозатраты на единицу продукции. Это обусловлено уменьшением переходных процессов и критических отклонений. Практика обучения специалистов теории управления, а также большинство учебной литературы используют наблюдение за переходным процессом вследствие изменения сигнала задания для проверки качества регулирования. В то же время большинство систем стабилизации технологических параметров предназначены для подавления возмущений в процессе функционирования. Иногда возникают задачи, при которых система подвергается частым возмущениям как со стороны канала возмущения, так и ввиду частого изменения сигнала задания.

Основная часть. Одним из вариантов решения проблемы является использование two-degree-of-freedom structure (2DoF) [1–7]. Существует классический вариант реализации структуры (рис. 1 [3]), но можно предложить и альтернативный вариант. Несмотря на введение дополнительных коэффициентов a и b , задачу поиска настроек регулятора можно легко разделить на два этапа: настройка основных коэффициентов K_P , T_I и T_D , а затем поиск дополнительных коэффициентов a и b .

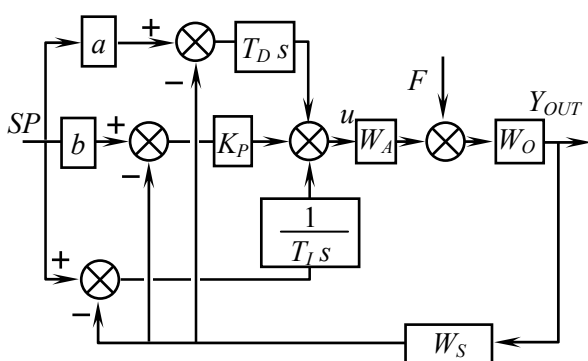


Рис. 1. Классический вариант регулятора с двумя степенями свободы (КРДСС).

SP – сигнал задания; Y_{OUT} – выход;
 K_P – коэффициент усиления; T_I – время интегрирования; T_D – время дифференцирования;
 W_A – передаточная функция исполнительного механизма; W_S – передаточная функция измерительного преобразователя;
 W_O – передаточная функция объекта; F – сигнал возмущения; s – оператор передаточной функции

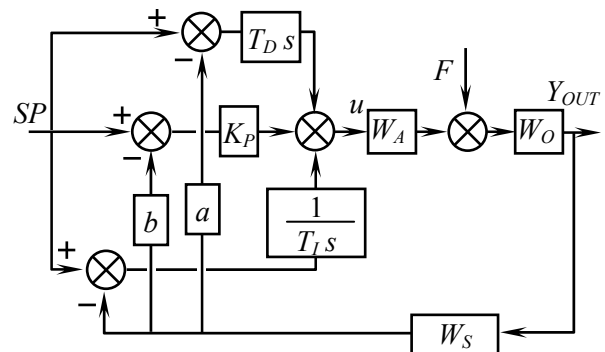


Рис. 2. Альтернативный вариант регулятора с двумя степенями свободы (АРДСС)

В качестве критерия настройки, как отражено в работе [8], легко можно использовать интегральные критерии [9]. В работе были использованы два интегральных критерия настройки.

Первый критерий является классическим, в то же время второй обеспечивает компромиссный вариант между быстродействием, перерегулированием и запасом по устойчивости [9].

$$\int_0^{tf} e(t)^2 dt \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$\int_0^{tf} t^2 |e(t)| dt \rightarrow \min. \quad (2)$$

При настройке по информационному каналу задания ошибка вычислялась как

$$e(t) = SP - Y_{OUT}. \quad (3)$$

При настройке по информационному каналу возмущения ошибка соответствовала выходному значению

$$e(t) = Y_{OUT}. \quad (4)$$

Алгоритм настройки предполагает попеременное применение формул (3) и (4). Для структуры на рис. 1 сначала находятся настройки K_P , T_I и T_D по критерию с использованием формулы (4), а затем по тому же критерию уже с использованием выражения (3) рассчитываются дополнительные коэффициенты a и b . В случае использования структуры на рис. 2 K_P , T_I и T_D определялись в соответствии с (3), а уже a и b по формуле (4).

Для исследования была выбрана система со следующими передаточными функциями:

$$W_A(s) = \frac{1}{5s + 1}; \tag{5}$$

$$W_S(s) = \frac{1}{10s + 1}; \tag{6}$$

$$W_O(s) = \frac{1}{(15s + 1)(25s + 1)} \exp(-\tau s). \tag{7}$$

Поскольку транспортное запаздывание времени τ существенно влияет на результат применения интегральных критериев [8], методика настройки была проверена для нескольких значений $\tau = [0; 3; 7,5; 15]$.

Минимизация критериев производилась в Matlab. Время моделирования для каждого значения τ было свое, оно определялось предварительным экспериментом. При использовании критерия (1) время tf было в 1,5 раза больше, чем при использовании критерия (2), что являлось следствием большей длительности процесса затухания.

Кроме линейных структур использовался и ПИД-регулятор с нелинейной характеристикой [8, 10].

$$\mu(e) = \text{sign}(e) \ln(1 + |e|) - 1. \tag{8}$$

При этом нелинейное преобразование использовалось только для интегральной и пропорциональной составляющих регулятора (второй вариант нелинейного ПИД-регулятора на рис. 3).

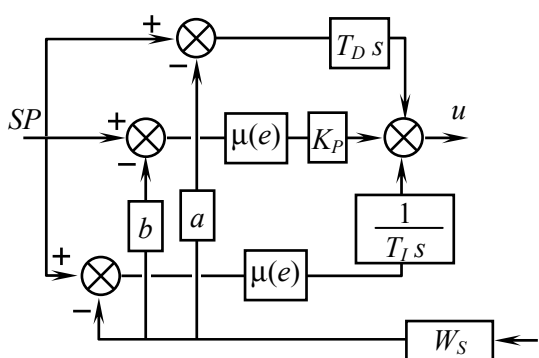


Рис. 3. Нелинейный альтернативный вариант регулятора с двумя степенями свободы

Соотношения между настройками линейного (LR) и нелинейного (NR) ПИД-регуляторов по каналу возмущения f и задания SP можно видеть в табл. 1–2, где $K_{P,SP}, T_{I,SP}, T_{D,SP}$ – настройки, которые были найдены при минимизации интегральных критериев по каналу сигнала задания; $K_{P,F}, T_{I,F}, T_{D,F}$ – настройки,

которые были найдены при минимизации интегральных критериев по каналу возмущения.

Таблица 1
Соотношения между параметрами регуляторов, которые найдены по критерию (1)

Тип ПИД	Соотношение параметров	τ, c			
		0	3	7,5	15
LR	$K_{P,SP}/K_{P,F}$	0,8615	0,8686	0,8690	0,8847
	$T_{I,SP}/T_{I,F}$	16,4030	7,2977	4,4148	2,9489
	$T_{D,SP}/T_{D,F}$	0,5319	0,6145	0,6391	0,6593
NR	$K_{P,SP}/K_{P,F}$	0,9375	0,9188	0,9000	0,8647
	$T_{I,SP}/T_{I,F}$	11,9070	6,1048	3,8248	2,6693
	$T_{D,SP}/T_{D,F}$	0,5737	0,6377	0,6598	0,6812

Таблица 2
Соотношения между параметрами регуляторов, которые найдены по критерию (2)

Тип ПИД	Соотношение параметров	τ, c			
		0	3	7,5	15
LR	$K_{P,SP}/K_{P,F}$	0,3689	0,5342	0,4882	0,6394
	$T_{I,SP}/T_{I,F}$	5,9179	3,4831	2,7151	1,9518
	$T_{D,SP}/T_{D,F}$	0,3486	0,5221	0,4102	0,5660
NR	$K_{P,SP}/K_{P,F}$	0,5797	0,7028	0,7083	0,7849
	$T_{I,SP}/T_{I,F}$	4,8036	2,8595	2,3341	1,6585
	$T_{D,SP}/T_{D,F}$	0,5107	0,6459	0,6205	0,7453

Табл. 3–7 получены путем деления значения интегрального критерия на минимальное значение интегрального критерия при данном запаздывании, где KID_{SP} – относительное значение интегрального критерия для настроек классического ПИД-регулятора, найденных при настройках по каналу задания; KID_F – относительное значение интегрального критерия для настроек классического ПИД-регулятора, найденных при настройках по каналу возмущения.

Таблица 3
Относительный интегральный критерий по возмущению по критерию (1)

Тип ПИД	Соотношение параметров	τ, c			
		0	3	7,5	15
LR	АРДСС	3,9087	2,4091	1,8054	1,4594
	KID_{SP}	5,2363	2,8780	2,0339	1,5660
	KID_F	1	1,0114	1,0192	1,0246
NR	АРДСС	3,1277	1,9829	1,5357	1,2920
	KID_{SP}	3,8849	2,3120	1,7251	1,4231
	KID_F	1,0024	1	1	1

Таблица 4
Относительный интегральный критерий по заданию по критерию (1)

Тип ПИД	Соотношение параметров	τ, c			
		0	3	7,5	15
LR	КРДСС	2,4908	1,7292	1,4404	1,2781
	KID_{SP}	1	1	1	1
	KID_F	2,9579	2,1497	1,7578	1,4768
NR	КРДСС	2,4406	1,8364	1,4698	1,2759
	KID_{SP}	1,0576	1,0601	1,0504	1,0503
	KID_F	2,4936	1,9342	1,5796	1,3642

Таблица 5
Относительный интегральный критерий по возмущению по критерию (2)

Тип ПИД	Соотношение параметров	τ, c			
		0	3	7,5	15
LR	АРДСС	10,986	5,9113	4,4847	2,7973
	KID_{SP}	28,975	14,531	7,0241	4,1731
	KID_F	1,0260	1,0375	1,0036	1,0563
NR	АРДСС	7,7601	4,8329	3,2140	2,3835
	KID_{SP}	27,575	12,215	5,8081	3,2652
	KID_F	1	1	1	1

Таблица 6
Относительный интегральный критерий по заданию по критерию (2)

Тип ПИД	Критерий	τ, c			
		0	3	7,5	15
LR	КРДСС	3,2499	2,6725	2,2413	2,0020
	KID_{SP}	1,0964	1,0028	1,0798	1
	KID_F	5,5760	4,6725	3,8762	3,2010
NR	КРДСС	6,5172	4,1317	3,1874	1,5022
	KID_{SP}	1	1	1	1,0195
	KID_F	6,5461	4,7148	4,0921	2,8739

Таблица 7
Относительное улучшение от использования структур КРДСС и АРДСС для обеспечения универсальности

Тип ПИД	Критерий	τ, c			
		0	3	7,5	15
$KID_F/КРДСС$					
LR	(2)	1,7157	1,7483	1,7294	1,5989
	(1)	1,1874	1,2430	1,2202	1,1554
NR	(2)	1,0044	1,1411	1,2839	1,9131
	(1)	1,0217	1,0533	1,0747	1,0692
$KID_{SP}/АРДСС$					
LR	(2)	2,5328	2,3851	1,5598	1,4897
	(1)	1,3565	1,1967	1,1271	1,0731
NR	(2)	3,2352	2,4157	1,7805	1,3669
	(1)	1,2483	1,1682	1,1252	1,1027

Анализ таблиц показывает, что отличия между оптимальными настройками регуляторов по каналу задания и возмущения могут

отличаться в несколько раз. Наибольшее отличие наблюдается во времени интегрирования. Следует отметить, что использование нелинейного преобразования ошибки придает ПИД-регулятору большую универсальность при стабилизации технологических параметров.

Данные таблиц показывают, что дополнительные коэффициенты настроек позволяют уменьшить значение интегральных критериев, однако не всегда существенно. Наибольший эффект достигается для объектов без запаздывания или при небольшом его значении. Улучшения наблюдаются также и по перерегулированию, и по времени переходного процесса (рис. 4–9). Использование критерия (1), как обычно [9], приводит к высокой колебательности и длительности затухания.

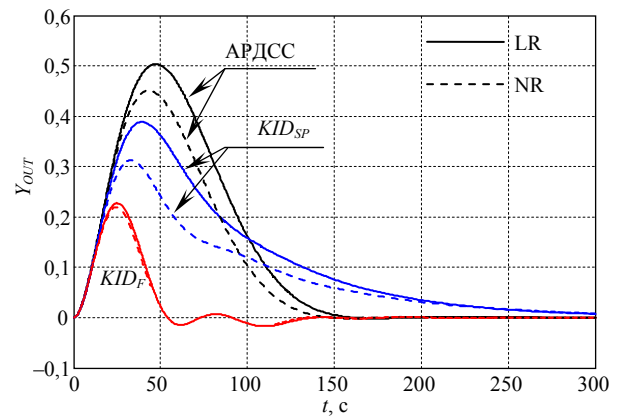


Рис. 4. Переходной процесс по возмущению для запаздывания $\tau = 0$. Настройка по критерию (2)

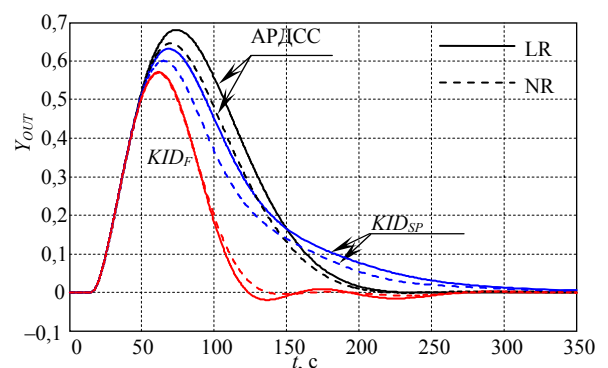


Рис. 5. Переходной процесс по возмущению для запаздывания $\tau = 15$. Настройка по критерию (2)

В целом структура КРДСС за счет дополнительных коэффициентов способствует уменьшению перерегулирования и времени переходного процесса. Структура АРДСС, в первую очередь, способствует улучшению быстродействия и уменьшению переходного процесса.

Результаты работы нелинейного регулятора по анализу таблиц и переходных процессов свидетельствуют о его преимуществе в сравнении с линейным регулятором. С практической точки зрения он показывает выигрыш не только по интегральному критерию, но и по времени переходного процесса, перерегулированию.

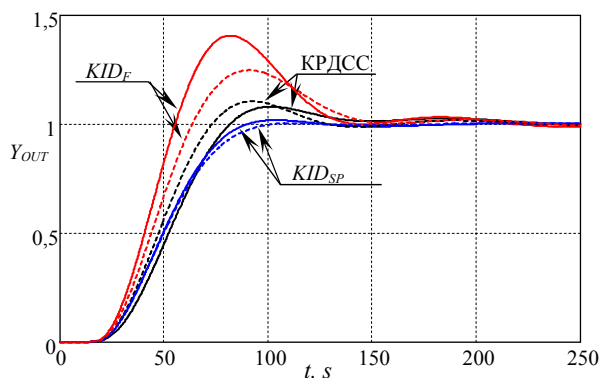


Рис. 6. Переходной процесс по заданию для запаздывания $\tau = 15$. Настройка по критерию (2)

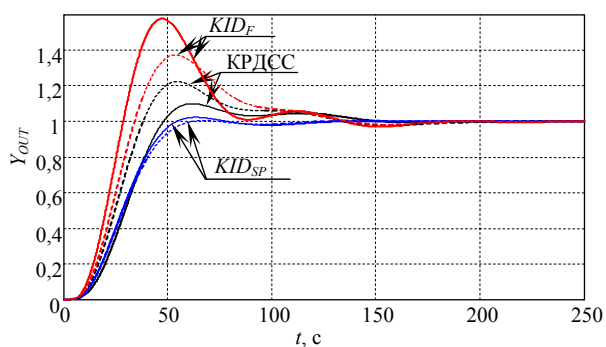


Рис. 7. Переходной процесс по заданию для запаздывания $\tau = 3$. Настройка по критерию (2)

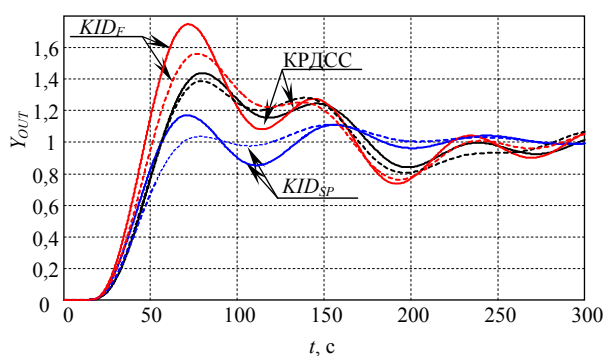


Рис. 8. Переходной процесс по заданию для запаздывания $\tau = 15$. Настройка по критерию (1)

Использование интегрального критерия (1) не способствует получению качественного переходного процесса для работы в прикладных условиях. Как было показано в публикации [9], использование данного критерия приводит к малому запасу по устойчивости, большому перерегулированию и длительному процессу затухания колебаний.

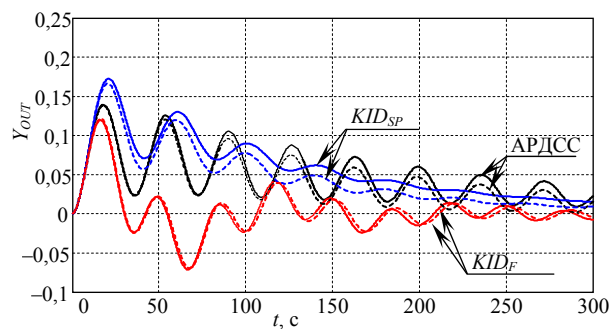


Рис. 9. Переходной процесс по возмущению для запаздывания $\tau = 0$. Настройка по критерию (1)

Следует отметить, что отдельно были проверены варианты использования 2DoF для ПИ-регулятора. Во многом они совпадают с результатами анализа работы ПИД-регулятора.

Методика последовательной настройки структуры 2DoF ПИД-регулятора путем использования интегрального критерия дает устойчивый вариант комплексной настройки. Одновременная настройка всех пяти коэффициентов позволит добиться большего баланса. Но в этом случае потребуется сформировать обобщенный критерий для канала по возмущению и сигналу задания с весовыми коэффициентами. Вариация этих весовых коэффициентов позволит перераспределять эффективность функционирования исходя из требований прикладной технологии.

Заключение. В результате проведенных исследований сделаем следующие выводы:

1. При использовании ПИД-регулятора для стабилизации технологических параметров следует заранее определить основные источники возмущений и на их основании производить выбор структуры и настройку регулятора two-degree-of-freedom.

2. Предложенные нелинейные варианты two-degree-of-freedom чаще всего обеспечивают лучшее качество функционирования контуров с обратными связями.

Литература

1. Aström K. J., Hägglund T. Advanced PID control. ISA – the Instrumentation, Systems, and Automation Society. Durham: Research Triangle Park, 2006. 461 p.
2. Alfaro V. M., Vilanova R. Model-Reference Robust Tuning of PID Controllers. Cham: Springer International Publishing Switzerland, 2016. 202 p.
3. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М.: Горячая линия – Телеком, 2009. 608 с.

4. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID controller tuning rules. London: Imperial College Press, 2009, 624 p.
5. Viteckova M., Vitecek A. 2DOF PI and PID Controllers Tuning // IFAC Proceedings. 2010. Vol. 43, issue 2. P. 343–348.
6. Latha K., Rajinikanth V. 2DOF PID controller tuning for unstable systems using bacterial foraging algorithm // SEMCCO 2012: Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing, Lecture Notes in Computer Science. 2012. P. 519–527. DOI: 0.1007/978-3-642-35380-2_61.
7. Multi-objective optimization based tuning tool for industrial 2DoF PID controllers / C. Gamboa [et al.] // IFAC-PapersOnLine, July 2017. Vol. 50, issue 1. P. 7511–7516.
8. Hryniuk D., Suhorukova I., Orobei I. Non-linear PID controller and methods of its setting // Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream), 2017, pp. 1–4. DOI: 10.1109/eStream.2017.7950327.
9. Гринюк Д. А., Оробей И. О., Сухорукова И. Г. Модификация интегральных критериев для повышения запаса по устойчивости // Труды БГТУ. 2012. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 118–121.
10. Гринюк Д. А., Оробей И. О., Кузьмицкий И. Ф. Численное исследование алгоритмов уменьшения интегрального насыщения // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. 2005. Вып. XIII. С. 140–143.

References

1. Aström K. J., Hägglund T. Advanced PID control. ISA – the Instrumentation, Systems, and Automation Society. Durham, Research Triangle Park, 2006. 461 p.
2. Alfaro V. M., Vilanova R. Model-Reference Robust Tuning of PID Controllers. Cham, Springer International Publishing Switzerland, 2016. 202 p.
3. Denisenko V. V. *Kompyuternoe upravlenie tekhnologicheskim protsessom, eksperimentom, oborudovaniem* [Computer control of technological process, experiment, equipment]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2009. 608 p.
4. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID controller tuning rules. London, Imperial College Press, 2009, 624 p.
5. Viteckova M., Vitecek A. 2DOF PI and PID Controllers Tuning. *IFAC Proceedings*, 2010, vol. 43, issue 2, pp. 343–348.
6. Latha K., Rajinikanth V. 2DOF PID controller tuning for unstable systems using bacterial foraging algorithm. *SEMCCO 2012: Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing, Lecture Notes in Computer Science*, 2012, pp. 519–527. DOI: 0.1007/978-3-642-35380-2_61.
7. Gamboa C., Rojas J. D., Arrieta O., Vilanova R. Multi-objective optimization based tuning tool for industrial 2DoF PID controllers. *IFAC-PapersOnLine*, July 2017, vol. 50, issue 1, pp. 7511–7516.
8. Hryniuk D., Suhorukova I., Orobei I. Non-linear PID controller and methods of its setting. *Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*, 2017, pp. 1–4. DOI: 10.1109/eStream.2017.7950327.
9. Hryniuk D. A., Orobey I. O., Sukhorukova I. G. Modification of integral criteria for increasing the margin of stability. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2012, no. 6, Physics and Mathematics. Informatics, pp. 118–121 (In Russian).
10. Hryniuk D. A., Orobey I. O., Kuz'mitskiy I. F. Numerical study of algorithms for decreasing integral saturation. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series VI, Physics and Mathematics. Informatics, 2005, issue XIII, pp. 140–143 (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

Сухорукова Ирина Геннадьевна – ассистент кафедры информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: irina_x@ Rambler.ru

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

Information about the authors

Hryniuk Dmitry 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

Suhorukova Irina Gennad'yevna – assistant lecturer, the Department of Information Systems and Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina_x@rambler.ru

Oliferovich 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: bogosnadya@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 15.05.2018