

**ДОКУКИНА Т. А., КОПОТЕВА А. В.  
ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ  
ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОМ ГАЗА В  
ГАЗОТРУБНОМ КОТЛЕ ЦКТИ-100**

*УДК 681.5.017, ВАК 2.3.5., ГРНТИ 50.43.17*

Применение нечеткого логического регулятора для повышения качества управления расходом газа в газотрубном котле ЦКТИ-100

Fuzzy Logic Controller Implementation for the Gas Flow Control Quality Improvement in Gas-Tube Boiler CCTI-100

**Т. А. Докукина, А. В. Копотева**

**T. A. Dokukina, A. V. Kopoteva**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, филиал в г. Березники, г. Березники

Perm national polytechnic research university, Berezniki branch, Berezniki

*В статье представлены результаты проектирования ПИД-подобных нечетких логических регуляторов различных типов для управления расходом газа в газотрубном котле цкти-100 и их моделирования средствами Matlab Simulink. Предложен и экспериментально проверен метод настройки нечетких регуляторов на основе использования геометрической прогрессии.*

*In the issue the results of designing PID-like fuzzy logic controllers of various types for controlling gas flow in a gas-tube boiler ccti-100 and their modeling by means of Matlab Simulink are presented. Geometric progression usage-based fuzzy controllers tuning method is proposed and experimentally tested.*

**Ключевые слова:** нечеткая логика, теория автоматического управления, ПИД-регулятор, показатели качества регулирования.

**Keywords:** fuzzy logic, automatic control theory, PID controller, control quality indicators.

### **Введение**

Управление сложными производственными объектами традиционно осуществляется с использованием ПИД-регуляторов [1, 2]. При этом активно проводятся исследования возможностей применения для этих целей регуляторов на основе нечеткой логики [3], [4], [5]. Наиболее часто в теоретических и прикладных исследованиях фигурируют ПИД-подобные нечеткие логические регуляторы (далее – НЛР). Проблема их настройки для целей управления различными техническими агрегатами является весьма нетривиальной. Как правило, соответствующие процедуры сложны и недостаточно подробно изложены в исследованиях. В данной работе выполнена настройка ПИ-

подобного НЛР для управления регулирующим органом по каналу расхода газа для котла ЦКТИ – 100 в АО «Березниковский содовый завод» и на основании системы показателей качества регулирования определен лучший из них. Настройка выполнена путем подбора знаменателя геометрической прогрессии для определения оснований функций принадлежности термов [6]. Данный метод достаточно несложен в понимании и практической реализации, и позволяет получить параметры НЛР, обеспечивающие высокое качество регулирования по сравнению с обычными ПИД-регуляторами. Метод предполагает:

- синтез контура управления с классическим ПИД-регулятором,
- настройку его для выбранного объекта управления,
- определение на основании данного контура диапазонов изменения входных и выходных параметров нечетких регуляторов,
- определение оснований функций принадлежности отдельных термов как элементов геометрической прогрессии,
- построение контура управления с нечетким регулятором;
- подбор знаменателя прогрессии, обеспечивающего наилучшее качество переходного процесса.

Синтез и моделирование соответствующих контуров управления выполнены в среде Matlab Simulink, настройка нечетких регуляторов – средствами Matlab FIS Editor.

### **Метод проектирования и настройки ПИД-подобных нечетких логических регуляторов**

Передаточная функция по каналу положения регулирующего органа расхода газа для котла ЦКТИ – 100 в АО «Березниковский содовый завод» имеет

$$\text{вид } W(s) \approx \frac{0,35}{40 \cdot s^2 + 12 \cdot s + 1} \cdot \exp(-1,5 \cdot s)$$

Для синтеза ПИД-подобных НЛР выполним анализ работы блочного ПИ-регулятора с автоматически подобранными параметрами в контуре с единичным скачком в качестве входного возмущающего воздействия (рисунок 1). Установлено, что ошибка управления Error изменяется в диапазоне от 0 до 0,162, интеграл ошибки управления Error\_Int – в диапазоне от 0 до 3,300, управление Control – от 0 до 1,065.

При проектировании нечетких регуляторов количество термов, как правило, является одинаковым для всех входных и выходного параметров. В данной работе ограничимся числом термов  $N=5$ , соответствующая лингвистическая переменная  $L^5$  описывается набором термов {«большое отрицательное» (БО); «малое отрицательное» (МО); «нулевое» (Н); «малое положительное» (МП); «большое положительное» (БП)}. Функции принадлежности термов «малое отрицательное»  $\mu_{52}(x)$ , «нулевое»  $\mu_{53}(x)$  и «малое положительное»  $\mu_{54}(x)$  являются треугольными, а термов «большое отрицательное»  $\mu_{51}(x)$  и «большое положительное»  $\mu_{55}(x)$  – трапециевидными. Треугольные функции принадлежности имеют по три параметра: левый и правый минимумы ( $l_{\min_{5i}}$  и

$rmin_{5i}$ ) такие, что  $\mu_{5i}(lmin_{5i})=\mu_{5i}(rmin_{5i})=0$ , и пиковое значение  $peak_{5i}$  такое, что  $\mu_{5i}(peak_{5i})=1$ ,  $i=2,3,4$ , причем пик нулевого значения симметричен относительно его минимумов, т. е.  $peak_{53}=(lmin_{53}+rmin_{53})/2$ . Трапецевидные функции принадлежности имеют по 4 параметра: левый и правый минимумы ( $lmin_{5i}$  и  $rmin_{5i}$ ) такие, что  $\mu_{5i}(lmin_{5i})=\mu_{5i}(rmin_{5i})=0$ , и левое и правое пиковые значения  $lpeak_{5i}$  и  $rpeak_{5i}$  такие, что  $\mu_{5i}(lpeak_{5i})=\mu_{5i}(rpeak_{5i})=1$ ,  $i=1,5$ . При этом пик функции принадлежности каждого терма совпадает с минимумами соседних термов (Рисунок ), а длины их оснований являются элементами геометрической прогрессии со знаменателем  $q>1$ . При этом функции принадлежности больших положительных и отрицательных, а также малых положительных и отрицательных термов симметричны относительно пикового значения нулевого терма.

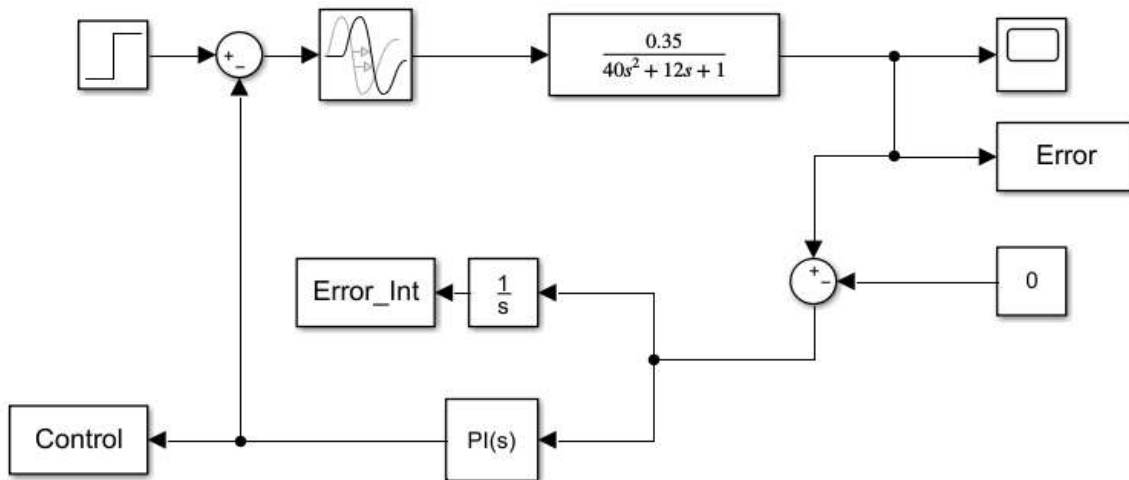


Рисунок 1. Контур управления с блочным ПИ-регулятором в Matlab Simulink

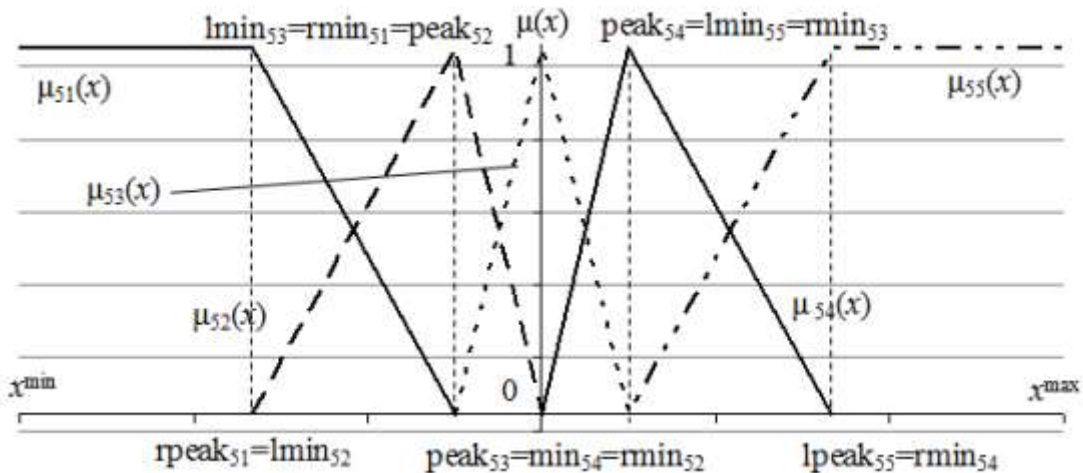


Рисунок 2. Лингвистическая переменная с пятью термами

Предположим, что основания функций принадлежности (далее – ФП) параметров представляют собой элементы геометрической прогрессии с начальным элементом, равным 1, и со знаменателем, например,  $q=2$ . Это означает, что основание функции принадлежности  $\mu_{53}(x)$  равно  $a_0=1$ , основания

функций принадлежности  $\mu_{52}(x)$  и  $\mu_{54}(x)$  составляют по  $a_1=a_0 \cdot q=1 \cdot q=q$ , а основания функций принадлежности  $\mu_{51}(x)$  и  $\mu_{55}(x)$  составляют по  $a_2=a_0 \cdot q^2=1 \cdot q^2=q^2$ . Тогда параметры функций принадлежности определяются Таблица . Очевидно, что полученная переменная изменяется в диапазоне от  $l_{\min 51}=-9$  до  $r_{\min 55}=9$ , тогда как реальные параметры НЛР изменяются каждый в своем диапазоне, т.е. значения Таблицы 1 требуют пересчета в соответствии с его длиной.

Таблица 1. Параметры функций принадлежности лингвистической переменной с пятью термами при различных значениях  $q$

Терм	Тип ФП	Длина основания	Параметры			
			lmin	lpeak	rpeak	rmin
БО	Трапеция	8	-9	-9	-2	-0,5
БП	Трапеция	8	0,5	2	9	9
МО	Треугольник	2	-2	-0,5	0	-
Н	Треугольник	1	-0,5	0	0,5	
МП	Треугольник	2	0	0,5	2	
			lmin	peak	rmin	

Выше были определены диапазоны изменения ошибки регулирования Error, ее интеграла Error\_Int и управления Control. Тогда в качестве начального интервала для входного П-параметра НЛР выбирается симметричный относительно нуля интервал вида  $[-\max_i |\text{Error}|; +\max_i |\text{Error}|]=[-0,162; 0,162]$ , для И-параметра – интервал  $[-\max_i |\text{Error\_Int}|; +\max_i |\text{Error\_Int}|]=[-3,300; 3,300]$ , а в качестве начального интервала для выходного параметра НЛР выбирается симметричный относительно величины входного возмущения (единицы) интервал вида  $[2-\max_i |\text{Control}|; \max_i |\text{Control}|]=[0,935; 1,065]$ . Результат пересчета значений таблицы 1 в соответствующих пропорциях на интервал для управления представлен в Таблице 2.

Таблица 2. Параметры функций принадлежности переменной Control с пятью термами при  $q=2$

Терм	Тип ФП	Длина основания	Параметры			
			lmin	lpeak	rpeak	rmin
БО	Трапеция	8	0,935	0,935	0,971	0,993
БП	Трапеция	8	1,007	1,029	1,065	1,065
МО	Треугольник	2	0,971	0,993	1,000	-
Н	Треугольник	1	0,993	1,000	1,007	
МП	Треугольник	2	1,000	1,007	1,029	
			lmin	peak	rmin	

Нечеткий ПИ-регулятор работает на основании матрицы знаний, представленной в Таблица 3. Число правил в базе составляет  $M^2$ , где  $M$  – число термов параметра, т.е. в нашем случае их 25.

Таблица 3. Матрица знаний для ПИ-подобного НЛР с 5 термами

		Значения входного П-параметра				
		БО	МО	Н	МП	БП
Значения входного И-параметра	БО	БО	БО	БО	МО	Н
	МО	БО	БО	МО	Н	МП
	Н	БО	МО	Н	МП	БП
	МП	МО	Н	МП	БП	БП
	БП	Н	МП	БП	БП	БП

### Практическая реализация метода проектирования и настройки ПИД-подобных нечетких логических регуляторов средствами Matlab Simulink

Контур управления регулирующим органом по каналу расхода газа для котла ЦКТИ – 100 в АО «Березниковский содовый завод» [7] с ПИ-подобным нечетким логическим регулятором, сконструированный в Matlab Simulink, представлен на Рисунок . Его входными параметрами являются ошибка регулирования Error и ее интеграл по времени регулирования Error Integral.

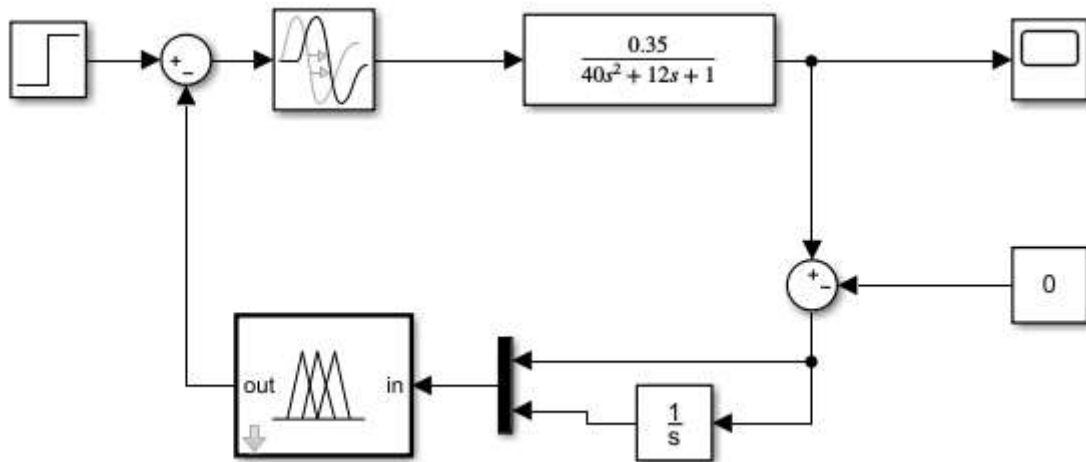


Рисунок 3. Контур управления с ПИ-подобным нечетким регулятором в Matlab Simulink

Результирующие переходные процессы в контуре управления с ПИ-подобным НЛР при различных значениях  $q$  из диапазона [1,5; 2,5] с шагом 0,1 представлены на Рисунке 4.

### Исследование результатов применения ПИД-подобных нечетких логических регуляторов для управления регулирующим органом по каналу расхода газа для котла ЦКТИ – 100

Анализ переходных процессов в контуре управления регулирующим органом по каналу расхода газа для котла ЦКТИ – 100 в АО «Березниковский

содовый завод» с ПИ-подобным нечетким логическим регулятором на временном интервале 300 с. позволил установить наличие двух их типов. При  $q \in \{1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,1; 2,3\}$  ошибка регулирования в рассматриваемом промежутке времени близкого к нулевому значения (рисунок 4); при  $q \in \{2,2; 2,4; 2,5\}$  ошибка регулирования колеблется с незатухающей амплитудой

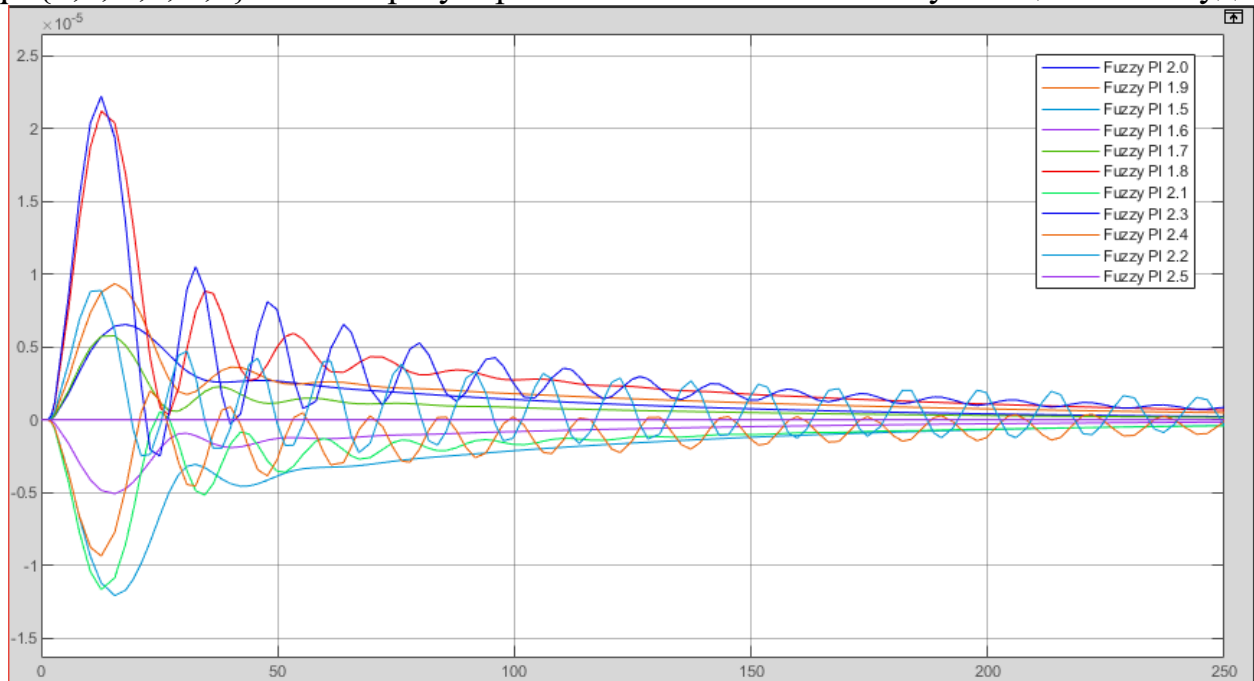


Рисунок 4. Переходные процессы при различных значениях  $q$

в окрестности нулевого значения. Полученные данные позволяют предположить, что для рассматриваемого объекта управления нечеткие регуляторы, построенные на геометрической прогрессии со знаменателем  $q < 2,2$ , позволяют добиться удовлетворительного качества регулирования, тогда как при  $q \geq 2,2$  соответствующие переходные процессы ведут себя непредсказуемо. При этом при  $q = 2,5$  переходный процесс достигает наиболее близкое к нулевому значение.

Для оценки качества управления нечетких логических регуляторов помимо максимума модуля рассогласования  $\max|\Delta Y(t)|$  и времени регулирования  $t_p$  было подсчитано количество смен знака переходного процесса  $N$  (таблица 4). На основании сравнения полученных показателей между собой, а также с соответствующими показателями работы обычного ПИ-регулятора можно утверждать следующее:

- По уровню  $\max|\Delta Y(t)|$  все рассмотренные нечеткие регуляторы позволяют добиться существенно лучшего качества управления по сравнению с обычным ПИ-регулятором. При этом нечеткий ПИ-регулятор со знаменателем  $q = 2,5$  позволяет добиться почти нулевого уровня  $\max|\Delta Y(t)|$ . За исключением НЛР с  $q = 2,5$  формально лучшее значение данного показателя достигается регуляторами с  $q = 1,6$  и  $q = 1,7$ .

- По величине времени регулирования  $t_p$  все рассмотренные нечеткие регуляторы также демонстрируют значительно лучшие результаты по

сравнению с обычным ПИ-регулятором. Лучшими по данному критерию вновь являются регуляторы с  $q=2,5$  и  $q=1,6$  и  $q=1,7$ .

– По числу переходов через ноль нечеткие регуляторы с  $q$  от 1,5 до 2,1, не уступают классическому ПИ-регулятору. Наихудшие результаты демонстрируют регуляторы с  $q=2,2$ ,  $q=2,4$  и  $q=2,5$ .

Таблица 4. Показатели качества управления нечетких регуляторов

Регулятор	$\max  \Delta Y(t) $	$t_p$	N
ПИ-регулятор	1,621e-01	177	0
ПИ-подобный НЛР с $q=1,5$	12,02e-06	130	0
ПИ-подобный НЛР с $q=1,6$	5,085e-06	46	0
ПИ-подобный НЛР с $q=1,7$	5,841e-06	43	0
ПИ-подобный НЛР с $q=1,8$	20,95e-06	165	0
ПИ-подобный НЛР с $q=1,9$	9,345e-06	121	0
ПИ-подобный НЛР с $q=2,0$	6,559e-06	94	0
ПИ-подобный НЛР с $q=2,1$	11,54e-06	106	2
ПИ-подобный НЛР с $q=2,2$	9,025e-06	276	$\infty$
ПИ-подобный НЛР с $q=2,3$	22,14e-06	163	4
ПИ-подобный НЛР с $q=2,4$	9,362e-06	167	$\infty$
ПИ-подобный НЛР с $q=2,5$	<b>8,662e-17</b>	0	$\infty$

### Заключение

В рамках проведенного исследования выполнен синтез и настройка ПИ-подобного НЛР и его настройка для управления положением регулирующего органа расхода газа для котла ЦКТИ – 100 в АО «Березниковский содовый завод». Удалось подобрать настройки нечеткого ПИ-регулятора, обеспечивающие лучшее качество регулирования по сравнению с классическим ПИ-регулятором. Результаты расчетов показали, что ПИ-подобные НЛР с  $q=1,6$  и  $q=1,7$  обеспечивают оптимальные значения максимума рассогласования (порядка  $10^{-6}$  против  $10^{-1}$  у классического ПИ-регулятора) и времени регулирования (менее 50 с. против 177 с. у классического ПИ-регулятора), а также отсутствие переходов через ноль.

### Список использованных источников и литературы

1. Хамане Х., Хирано К., Касе К., Миядзаки К. Промышленный ПИД-регулятор температуры для бессвинцового паяльника // IFAC Proceedings Volumes. 2008. Том 41, Выпуск 2. Стр. 10838-10843.
2. Шуво Мд. Ш., Иштиак Ф., Джейми Т., Дас Дж., Саха С.. Анализ внутренней системы охлаждения в вентилируемой полости с использованием П-, ПИ-, ПИД-регуляторов // Результаты в машиностроении. 2022. Том 15. Стр. 100579.
3. Варшней А., Гупта Д., Двиведи Б. Реакция скорости бесщеточного двигателя постоянного тока с использованием нечеткого ПИД-регулятора при изменении условий нагрузки // Журнал электрических систем и информационных технологий. 2017. Том 4, Выпуск 2. Стр. 310-321.

4. Канагалакшми С., Манамалли Д., Рафик М. М. Реализация многомодельного ПИД- и нечеткого регулятора в режиме реального времени для термопластавтоматов // IFAC Proceedings Volumes. 2013. Том 46, выпуск 32. Стр. 493-498.

5. Наин З. М. Разработка системы управления позиционированием сервопривода с применением пид-регулятора и контроллера нечеткой логики // Известия вузов. Электроника. 2021. №6. С. 583-588.

6. Копотева А. В. Использование геометрической прогрессии для определения параметров функций принадлежности при настройке нечеткого регулятора ПИ-типа // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, № 3. С. 18-28.

7. Затонский А. В., Уфимцева В. Н. Разработка объектных средств имитационного и многоагентного моделирования производственных процессов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2018. № 4. С. 56-62.

### List of references

1. Hamane H., Hirano K., Kase K., Miyazaki K. Industrial Temperature PID Controller for Pb-Free Soldering Iron // IFAC Proceedings Volumes. 2008. Volume 41, Issue 2. PP. 10838-10843.

2. Shuvo Md. Sh., Ishtiaq F., Jamee T., Das J., Saha S.. Analysis of internal cooling system in a vented cavity using P, PI, PID controllers // Results in Engineering. 2022. Volume 15. PP. 100579.

3. Varshney A., Gupta D., Dwivedi Bh. Speed response of brushless DC motor using fuzzy PID controller under varying load condition // Journal of Electrical Systems and Information Technology. 2017. Volume 4, Issue 2. Pp. 310-321.

4. Kanagalakshmi S., Manamalli D., Rafiq M. M. Real time Implementation of multimodel based PID and Fuzzy controller for Injection molding machine // IFAC Proceedings Volumes. 2013. Volume 46, Issue 32. PP. 493-498.

5. Nain Z. M. Development of a servo positioning control system using a pid-controller and a fuzzy logic controller. Izvestiya vuzov. Electronics. 2021. №6. С. 583-588.

6. Kopoteva A. V. Using a geometric progression to determine the parameters of membership functions when setting up a PI-type fuzzy controller // Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer technologies, control, radio electronics". 2020. V. 20, No. 3. S. 18-28.

7. Zatonsky A. V., Ufimtseva V. N. Development of object means of simulation and multi-agent modeling of production processes // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Informatics. 2018. No. 4. S. 56-62.