

УДК 004.896

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-3-105-110

Исследование возможности построения нейронечеткого логического регулятора с дискретными термами для управления и автоматизации объектов нефтегазового машиностроения

А. М. Сагдатуллин, кандидат технических наук, Лениногорский филиал Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева – КАИ, Лениногорск, Россия

Исследуется вопрос повышения эффективности функционирования классических систем управления технологическими процессами и объектами нефтегазового машиностроения. Актуальность данной темы заключается в необходимости повышения качества работы систем управления процессами добычи и транспортировки нефти и газа. Цель научной работы заключается в разработке нейронечеткого логического регулятора с дискретными термами для управления и автоматизации насосных агрегатов и насосных станций. Отмечается, что нечеткая логика, нейросетевые алгоритмы совместно с методами регулирования на основе адаптации и синтеза объектов управления позволяют обучаться системе автоматизации и работать в условиях неопределенности. Изучены методы построения классических систем управления, проанализированы достоинства и недостатки нечетких регуляторов как основной системы управления. Предложен метод построения системы управления на основе нейронечеткого регулятора с дискретными термами в условиях неопределенности и динамических параметров процесса. К положительным особенностям предлагаемого регулятора можно отнести: комбинирование нечетких рассуждений о технологическом объекте и математических предсказательных моделях, нечеткая система управления получает возможность субъективного описания на основе нейросетевых структур, а также адаптация к особенностям объекта. Приведен график зависимости для терм-множества управляемого параметра от степени принадлежности. Представлена возможная реализация отслеживания срабатывания одного из правил нейронечеткой системы в формате функциональных блок-диаграмм. Рассмотрен процесс формирования экспертной базы знаний в нейронечеткой системе управления. Для анализа приведен график зависимости выходного значения параметров. Согласно полученным результатам отклонение значений для модели и реального процесса не превышает 18 %, что позволяет говорить о достаточно стабильной работе нейронечеткого регулятора в системах автоматического управления.

Ключевые слова: нечеткая логика, нейронные сети, нейронечеткий регулятор с дискретными термами.

Введение

Установки нефтегазового машиностроения повсеместно используются для добычи, транспортировки и подготовки нефти и газа, а также попутной воды до конечного потребителя. Энергетическая составляющая любого производства, по большей части, влияет на рентабельность технологических процессов. Основой современного подхода к повышению эффективности работы машиностроительных установок и комплексов, таких как насосное оборудование, являются различные системы управления технологическими процессами. Это и системы с пропорционально-дифференциальными или пропорционально-дифференциально-интегральными регуляторами, системы прямого цифрового регулирования задвижками, клапанами и трубопроводной арматурой на основе существующих обратных связей.

Данные методы во многих случаях позволяют решить проблему регулирования объектами управления. Однако многие объекты и процессы содержат неопределенности различных видов (информационные и параметрические), могут иметь нелинейные участки работы. Все эти факторы отражаются на качестве регулирования и управления технологическими процессами. Так, анализ работы классических систем регулирования показал, что в условиях нестационарности технологических процессов или значительных колебаний отдельных параметров регулирование, основанное на методах нечеткой логики, отрабатывает существенно лучше [1, 2].

В связи с этим основной целью данной работы является разработка нейронечеткого логического регулятора с дискретными термами для управления и автоматизации насосных агрегатов и насосных станций.

Разработка метода и алгоритмов работы нейронечеткого регулятора технологических процессов с дискретными термами

В настоящее время существуют различные методы повышения эффективности классических систем управления. Это и нечеткая логика, классические методы регулирования с проведенной адаптацией и синтезом к объектам регулирования, регуляторы на основе нечеткой логики и обучения к объекту управления. Однако комбинирование отдельных методов рассматривается значительно реже из-за более сложной реализации в управлении комплексными объектами и присущими недостатками к нечетким системам. Нечеткая логика, предложенная Л. Заде, позволяет представлять вербальное описание функционирования процессов и систем автоматического управления технологическими установками добычи и транспортировки нефти. Отличительной особенностью такого описания является использование базы знаний и экспертного опыта, что и положительно отличает данный подход. Благодаря комбинированию нечетких рассуждений о технологическом объекте и математиче-

ских предсказательных моделей нечеткая система управления получает возможность субъективного описания на основе нейросетевых структур. Это позволяет еще глубже настроить описательную модель объекта, уменьшить вычислительную нагрузку на станции контроля и регулирования [3–7].

Важным шагом в разработке нейронечеткого регулятора [8, 9] с дискретными термами является разработка функций принадлежности для заданного технологического процесса [10]. Существуют различные представления функций технологических процессов, отличающихся математическим описанием [11–14]. Особенностью разрабатываемого регулятора является применение специальной системы функций принадлежности, представленной на рис. 1.

Выражение терм-множества по заданной переменной можно представить в аналитическом виде:

$$T(I_1) = \sum_{i=1}^{16} I_1 \cdot ((i-1) \cdot 0,25 \leq I_1 < i \cdot 0,25),$$

где I_1 – входной параметр системы, $i \in [1, n]$.

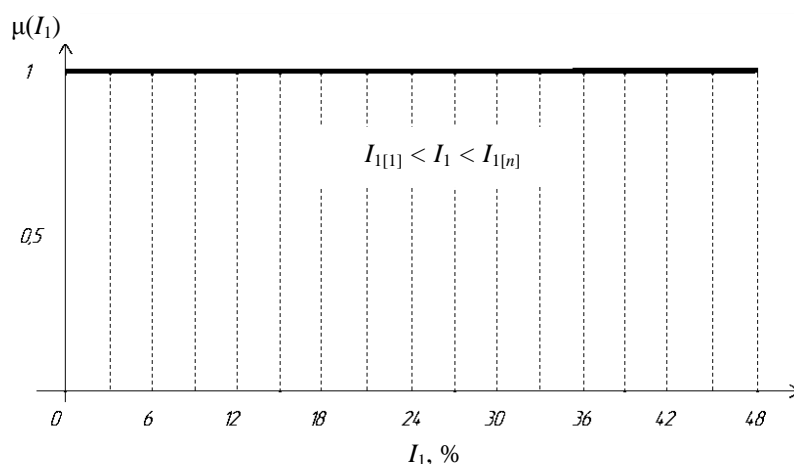


Рис. 1. График зависимости для терм-множества параметра I_1 от уровня принадлежности
Fig. 1. Graph of dependence for the term-set of the parameter I_1 on the level of membership

Затем в работу вступают системы продукционных правил. Вербальное описание рассматриваемого объекта на основе экспертных знаний преобразуют фаззифицированные значения в весовой слой нечеткой подсистемы согласно следующему выражению:

$$FW_{1..n} = T(I_i)_{1..n} \cdot \omega(FR)_{1..n},$$

где $T(I_i)_{1..n}$ – входное значение этапа фаззификации, $\omega(FR)_{1..n}$ – вес отработавшего правила.

Для того чтобы системы нечеткого логического вывода могли работать, в маломощных устройствах используются методы представления полученной системы управления в логической форме на универсальных языках программирования контроллеров. На рис. 2 представлена возможная реализация отслеживания срабатывания одного из правил нейронечеткой системы в формате функциональных блоковых диаграмм.

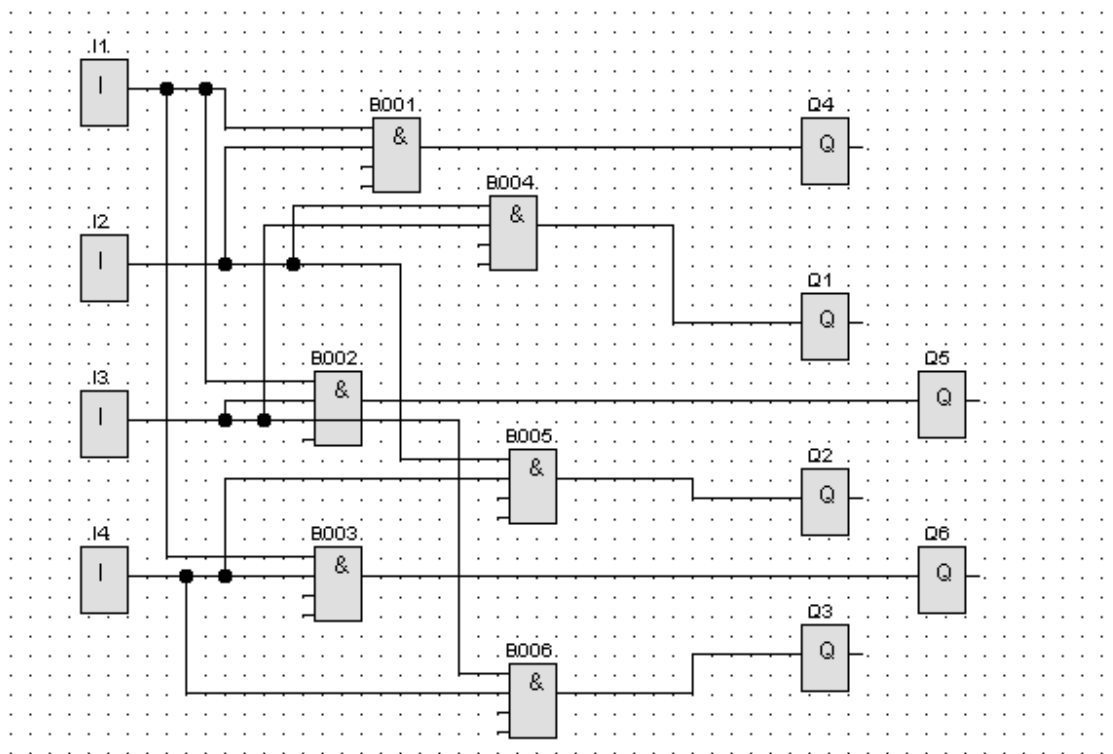


Рис. 2. Реализация отслеживания срабатывания одного из правил нейронечеткой системы в формате функциональных блок-диаграмм

Fig. 2. Implementation of tracking the triggering of one of the rules of the neural fuzzy system in the format of functional block diagrams

Полученные значения $FW_{1..n}$ сравниваются с остальными правилами, сработавшими в нечеткой системе, что позволяет определить наиболее сильную взаимосвязь в сложившейся конфигурации параметров (рис. 3).

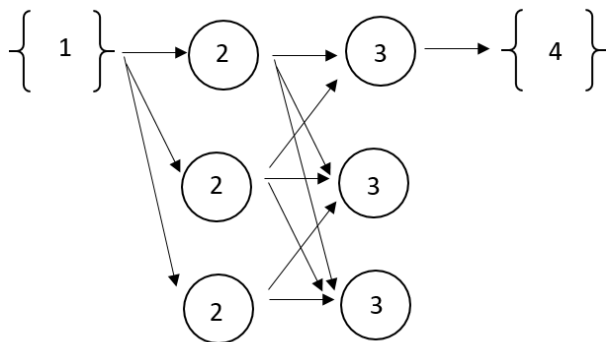


Рис. 3. Функциональная схема работы нейронечеткого регулятора, где 1 – фаззификация входных значений; 2 – нечеткие правила для входов x_i ; 3 – сравнение значений

Fig. 3. Functional diagram of the neuro-fuzzy controller, where 1 – fuzzification of input values; 2 – fuzzy rules for inputs x_i ; 3 – comparison of values

Полученные значения проходят этап преобразования и сравнения с текущей и тестовой выборкой нейронной сети. Выходные значения

переменной формируются на основе продукционных правил (таблица).

В таблице представлены: x – входное значение, z – выходное значение, множества нечеткой логики – A_i, B_i , функции принадлежности представленных множеств – $\mu_A(x)$ и $\mu_B(z)$.

Формирование экспертной базы знаний в нейронечеткой системе управления
Formation of an expert knowledge base in a neuro-fuzzy control system

Правило #1	$\Pi_1 : \text{if } x \rightarrow A_1, \text{ then } z \rightarrow B_1,$
Правило #2	$\Pi_2 : \text{if } x \rightarrow A_2, \text{ then } z \rightarrow B_2,$
Правило #3	$\Pi_3 : \text{if } x \rightarrow A_3, \text{ then } z \rightarrow B_3,$
.....
Правило #n	$\Pi_n : \text{if } x \rightarrow A_n, \text{ then } z \rightarrow B_n.$

Для работы экспертной базы знаний в нейронечеткой системе управления необходимо наличие базы данных и формирование экспертной подсистемы регулятора.

Аналитически терм-множества параметра от уровня принадлежности можно интерпретировать следующим образом:

$$T(p) = \{T_1(0 \leq p < l), T_2(l \leq p < 2l), T_3(2l \leq p < 3l), \dots, T_i((i-1)l \leq p < il), T_n((n-1)l \leq p < nl)\},$$

$$T(p) = \sum_{i=1}^n T_i((i-1)l \leq p < il),$$

где l – ширина заданного термина.

Работа системы на основе данного подхода позволяет обрабатывать возмущающие воздействия, свойственные технологическим процессам добычи и транспортировки нефти. Уравнения, которыми можно представить систему, могут изменяться:

$$8,587 \frac{d^n}{dt^n} y_i(t) + 365,785 \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} y_i(t) + \dots + 167,238 \frac{d}{dt} y_i(t) + 437,467 y_i(t) \Rightarrow,$$

$$28,697 \frac{d^n}{dt^n} x_i(t) + 348,912 \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} x_i(t) + \dots + 287,348 \frac{d^{n+1}}{dt^{n+1}} x_i(t) + \dots + 873,618 \frac{d^n}{dt^n} x_i(t).$$

$p = d/dt$ – оператор дифференцирования; $x_i(p)$, $y_i(p)$ – входной и выходной параметры системы, числитель и знаменатель – полиномы системы, полученные в результате дифференцирования, имеющие астатизм степени k .

Динамика и непрерывное изменение множества параметров создают дополнительные неопределенности в данных уравнениях. Технологические процессы при этом, обладая схожими элементами, могут существенно отличаться и однозначная формализация по имеющимся аналогиям сложно осуществима.

На рис. 4 представлен график выходной характеристики действительного значения и прогнозируемой величины.

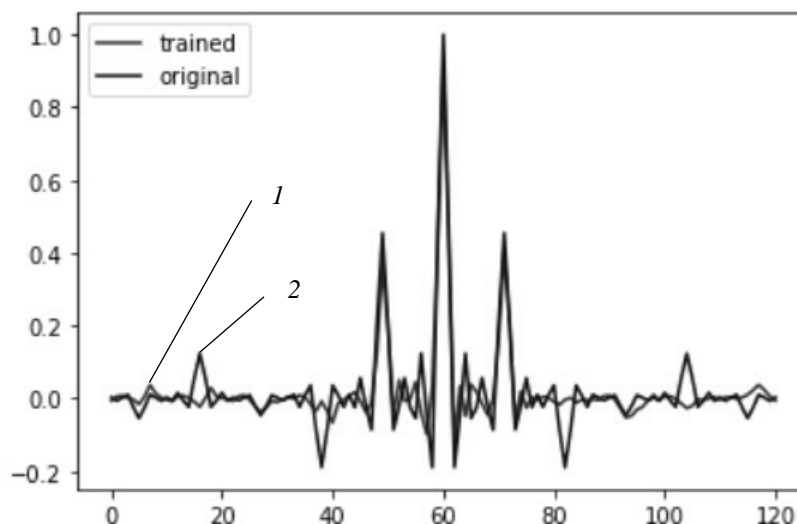


Рис. 4. График зависимости выходного значения параметров:

1 – моделируемого значения, 2 – реального значения

Fig. 4. Graph of dependence of the output value of the parameters: 1 – simulated value, 2 – real value

Согласно полученным результатам (рис. 4) можно сделать вывод, что отклонение моделируемого и реального значений контролируемой величины не превышает 18 %. Это говорит о достаточно стабильной работе нейронечеткого регулятора. В системах автоматического управления данное свойство адаптивности позволяет обрабатывать значительные возмущающие воздействия и работать в условиях неопределенности.

Выводы

Таким образом, в условиях необходимости повышения эффективности технологических

систем и работы установок нефтегазового машиностроения предложен метод управления и разработки нейронечетких логических регуляторов. Для насосных станций и штанговых скважинных насосных установок данный тип регулирования является приоритетным вследствие следующего преимущества: работа регулятора основана на экспертном опыте и вербальном описании технологического процесса и установок. Анализ работы регулятора показал свою эффективность, а ошибка прогнозирования параметра не превышала 18 %.

Библиографические ссылки

1. Земцов А. Ф., Грязнов И. Е., Поступаева С. Г. Сравнительный анализ и исследование работы классического ПИД-регулятора с «нечеткими» его разновидностями // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2018. № 2 (212). С. 63–66.
2. Исследование классических и нечетких ПИД регуляторов для нестационарных объектов управления / В. И. Копылов, Д. И. Муравьев, В. Г. Коломыцев, Г. И. Рустамханова // Фундаментальные исследования. 2016. № 11. С. 532–536.
3. Бураков М. В., Кирпичников А. П. Нечеткий регулятор ПИД-типа для нелинейного объекта // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18, № 4. С. 242–244.
4. Дегтярев Г. Л., Сагдатуллин А. М. Модель интеллектуальной поддержки управления процессами добычи и транспорта нефти в условиях неопределенности // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2020. Т. 1. С. 11–17.
5. Ahmed T. Analysis and Design of a Fuzzy Controller and Performance Comparison Between the PID Controller and Fuzzy Controller // International journal of scientific & technology research. Vol. 9, Iss. 10, 2020.
6. Mardlijah et al. Comparison between PID controller and fuzzy sliding mode control (FSMC) on super heater system. 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1218 012055.
7. Nun Pitalúa-Díaz et al. Comparative Analysis between Conventional PI and Fuzzy Logic PI Controllers for Indoor Benzene Concentrations // Sustainability 2015, 7, 5398-5412; doi:10.3390/su7055398.
8. Ontiveros-Robles E., Melin P. and Castillo O. Comparative analysis of noise robustness of type 2 fuzzy logic controllers. *Kybernetika*. Vol. 5 4, 2018, N 1, pp. 175-201.
9. Катасёв А. С. Нейронечеткая модель формирования нечетких правил для оценки состояния объектов в условиях неопределенности // Компьютерные исследования и моделирование. 2019. Т. 11. Вып. 3. С. 477–492.
10. Сагдатуллин А. М. Разработка операторского интерфейса удаленного телеуправления для монитора реального времени заполнения смеси // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2020. Т. 76, № 1. С. 99–103.
11. Harliana P., Rahim R. Comparative Analysis of Membership Function on Mamdani Fuzzy Inference System for Decision Making. 2017 J. Phys.: Conf. Ser. 930 012029
12. Сагдатуллин А. М. Применение новой информационной модели при обучении моделированию производственных объектов машиностроения в условиях аддитивного производства // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2020. Т. 76, № 1. С. 94–98.
13. Надеждин И. С., Горюнов А. Г., Маненти Ф. Системы управления нестационарным объектом на основе МРС-регулятора и ПИД-регулятора с нечеткой логикой // Управление большими системами: сборник трудов. 2018. № 75. С. 50–75.
14. Пенской И. С., Рогозин О. В. Нейронечеткий ПИД-регулятор в задаче угловой стабилизации мультироторного БПЛА // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2018. № 21. С. 320–327.

References

1. Zemcov A.F., Grjaznov I.E., Postupaeva S.G. [Comparative analysis and study of the work of the classical PID-controller with its "fuzzy" varieties]. *Izvestija Volgogradskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2018. No. 2. Pp. 63-66. (in Russ.)
2. Kopylov V.I., Murav'ev D.I., Kolomycev V.G., Rustamhanova G.I. [Study of classical and fuzzy PID controllers for non-stationary control objects]. *Fundamental'nye issledovanija*. 2016. No. 11. Pp. 532-536 (in Russ.).
3. Burakov M.V., Kirpichnikov A.P. [Fuzzy pid-type regulator for a nonlinear object]. *Vestnik Tehnologičeskogo universiteta*. 2015. Vol. 18, no. 4. Pp. 242-244 (in Russ.).
4. Degtjarev G.L., Sagdatullin A.M. [A model of intellectual support for the management of oil production and transportation processes in conditions of uncertainty]. *Matematicheskie metody v tehnike i tehnologijah - MMTT*. 2020. Vol. 1. Pp. 11-17 (in Russ.).
5. Ahmed T. Analysis and Design of a Fuzzy Controller and Performance Comparison Between the PID Controller and Fuzzy Controller // International journal of scientific & technology research. Vol. 9, Iss. 10, 2020.
6. Mardlijah et al. Comparison between PID controller and fuzzy sliding mode control (FSMC) on super heater system. 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1218 012055.
7. Nun Pitalúa-Díaz et al. Comparative Analysis between Conventional PI and Fuzzy Logic PI Controllers for Indoor Benzene Concentrations. In Sustainability 2015, 7, 5398-5412; doi:10.3390/su7055398/
8. Ontiveros-Robles E., Melin P. and Castillo O. Comparative analysis of noise robustness of type 2 fuzzy logic controllers. *Kybernetika*. 2018. Vol. 5 4. No. 1, pp. 175-201.
9. Katsjov A. S. [Neuro-fuzzy model of the formation of fuzzy rules for assessing the state of objects in conditions of uncertainty]. *Komp'juternye issledovanija i modelirovanie*. 2019. Vol. 11. Vyp. 3. Pp. 477-492. (in Russ.).
10. Sagdatullin A.M. [Development of an operator interface for remote telecontrol for a real-time monitor of filling the mixture]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2020. Vol. 76, no. 1. Pp. 99-103 (in Russ.).
11. Harliana P., Rahim R. Comparative Analysis of Membership Function on Mamdani Fuzzy Inference System for Decision Making. 2017 J. Phys.: Conf. Ser. 930 012029.

12. Sagdatullin A.M. [Application of a new information model in teaching the modeling of industrial facilities in mechanical engineering in the conditions of additive manufacturing]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2020. Vol. 76, no. 1. Pp. 94-98 (in Russ.).

13. Nadezhdin I.S., Gorjunov A.G., Manenti F. [Control systems for non-stationary objects based on

mpc-controller and pid-controller with fuzzy logic]. *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov*. 2018. No. 75. Pp. 50-75 (in Russ.).

14. Penskoj I.S., Rogozin O.V. [Neuro-fuzzy PID-controller in the problem of angular stabilization of a multi-rotor UAV]. *Novye informacionnye tekhnologii v avtomatizirovannyh sistemah*. 2018. No. 21. Pp. 320-327 (in Russ.).

Investigation of the Possibility of Building a Neural Fuzzy Logic Controller with Discrete Terms for Controlling and Automating Oil and Gas Engineering Facilities

A. M. Sagdatullin, PhD in Engineering, Leninogorsk branch of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

The issue of increasing the efficiency of functioning of classical control systems for technological processes and objects of oil and gas engineering is investigated. The relevance of this topic lies in the need to improve the quality of the control systems for the production and transportation of oil and gas. The purpose of the scientific work is to develop a neuro-fuzzy logic controller with discrete terms for the control and automation of pumping units and pumping stations. It is noted that fuzzy logic, neural network algorithms, together with control methods based on adaptation and synthesis of control objects, make it possible to learn the automation system and work under conditions of uncertainty. Methods for constructing classical control systems are studied, the advantages and disadvantages of fuzzy controllers, as the main control system, are analyzed. A method for constructing a control system based on a neuro-fuzzy controller with discrete terms in conditions of uncertainty and dynamic parameters of the process is proposed. The positive features of the proposed regulator include a combination of fuzzy reasoning about a technological object and mathematical predictive models, a fuzzy control system gains the possibility of subjective description based on neural network structures, as well as adaptation to the characteristics of the object. The graph of dependence for the term-set of the controlled parameter on the degree of membership is presented. A possible implementation of tracking the triggering of one of the rules of the neuro-fuzzy system in the format of functional block diagrams is presented. The process of forming an expert knowledge base in a neuro-fuzzy control system is considered. For analysis, a graph of the dependence of the output parameter values is shown. According to the results obtained, the deviation of the values for the model and the real process does not exceed 18%, which allows us to speak of a fairly stable operation of the neuro-fuzzy controller in automatic control systems.

Keywords: fuzzy logic, neural networks, neuro-fuzzy controller with discrete terms.

Получено: 02.03.2021