

УДК 62-83:62-55+004.032.26

EDN DOTKPK

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ
В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ
УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

Я.К. Старостина

ORCID: 0000-0003-2064-0067 e-mail: yaroslava.starostina@bk.ru

Ульяновский государственный технический университет

Ульяновск, Россия

А.Д. Токарев

ORCID: 0009-0003-4195-9859 e-mail: andreyka_tokarev_96@mail.ru

Ульяновский государственный технический университет

Ульяновск, Россия

Д.Д. Поснов

ORCID: 0009-0004-7037-7986 e-mail: danila_posnov@mail.ru

Ульяновский государственный технический университет

Ульяновск, Россия

Рассматривается важное направление нейронных сетевых технологий – использование нейронных пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов (ПИД-регуляторов). Особое внимание уделяется структурной схеме нейросетевого ПИД-регулятора. Нейронная сеть с использованием ПИД-регуляторов может обеспечить повышение точности регулирования, адаптацию к изменяющимся условиям и быструю реакцию на внешние воздействия. Настройка регуляторов с помощью использования интеллектуальных методов позволит существенно улучшить эффективность и надежность систем управления в различных технических процессах.

Ключевые слова: нейросетевой регулятор, ПИД-регулятор, регулятор, система управления, электропривод.

Для цитирования: Старостина Я.К., Токарев А.Д., Поснов Д.Д. Использование нейросетевых регуляторов в автоматизированных системах управления электроприводом // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 4. С. 47-57.
EDN DOTKPK

USE OF NETWORK REGULATORS IN AUTOMATED ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEMS

Ya.K. Starostina

ORCID: 0000-0003-2064-0067 e-mail: yaroslava.starostina@bk.ru
Ulyanovsk State Technical University
Ulyanovsk, Russia

A.D. Tokarev

ORCID: 0009-0003-4195-9859 e-mail: andreyka_tokarev_96@mail.ru
Ulyanovsk State Technical University
Ulyanovsk, Russia

D.D. Posnov

ORCID: 0009-0004-7037-7986 e-mail: danila_posnov@mail.ru
Ulyanovsk State Technical University
Ulyanovsk, Russia

Abstract. The article discusses an important area of application of neural networks – the use of neural proportional-integral-differential regulators (PID controller). Special attention is paid to the structural scheme of the neural network PID controller. Neural network using PID controllers can provide an increase in the accuracy of regulation, adaptation to changing conditions and a quick response to external influences. Adjusting regulators using intelligent methods will significantly improve the efficiency and reliability of control systems in various technical processes.

Keywords: neural network controller, PID controller, controller, control system, electric drive.

For citation: Ya.K. Starostina, A.D. Tokarev and D.D. Posnov, “Use of network regulators in automated electric drive control systems”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 47-57, 2024. EDN DOTKPK

I. Введение

Для развития автоматизированных системы управления (СУ) в настоящее время создается множество различных устройств, обеспечивающих точность, гибкость и простоту функционирования системы.

Целью данного исследования является выявление особенностей работы СУ при использовании нейросетевых регуляторов. Для этого поставлены следующие задачи: рассмотрение и описание структуры нейросетевого регулятора, описание работы нейросетевых регуляторов при ступенчатом и синусоидальном входных сигналах, предоставление соответствующих выводов проведенного исследования.

II. Нейросетевой регулятор

Регулятор на основе нейросети представляет собой СУ, использующую нейронные сети для принятия решений по управлению динамическими системами. Такие регуляторы применяются в сложных системах, где традиционные методы управления могут быть недостаточно эффективными. Основная идея заключается в том, чтобы использовать способность нейронных сетей к обучению и обобщению для моделирования и управления объектом.

Нейросеть представляет собой математическую модель, составленную из огромного количества искусственных нейронов, объединенных взаимосвязями, аналогичными связям между нервными клетками в организмах животных и людей [1]. Задачей нейросети является преобразование информации в наиболее удачный формат (текстовый, сигнальный, визуальный и т.д.), обеспечивающий удобство дальнейшей обработки оператором. Для этого сеть предварительно проходит процесс обучения. В процессе обучения используются эталонные значения пар, по которым можно оценить поведение используемой нейронной сети [2].

Огромным недостатком современных нейрорегуляторов является нехватка обоснованной методики синтеза, которая гарантирует устойчивость замкнутой системы [3].

Нейрорегулятор (рис. 1) используется при управлении производственной операцией, выполняя расчеты. Он приведен в качестве комплекса, состоящего из нескольких блоков (1 – объект управления, 2 – блок первичной переработки данных, 3 – блок ввода/вывода данных, 4 – задание оператора; 5 – блок реализации алгоритмов ПИД-регулирования, 6 – блок многопараметрического управления, 7 – блок истории работы системы, 7-1 – блок сбора параметров работы объекта управления, 7-2 – блок формирования рабочих массивов, 7-3 – блок формулы коэффициента эффективности, 7-4 – блок сбора значений коэффициента эффективности, 8 – блок интеллектуального классификатора, 9 – блок моделирования, 10 – блок управления, 11 – блок поступления данных с лаборатории, 12 – блок выбора способа управления).

Компонент первичной обработки информации 2 используется для преобразования входных данных с объекта управления в формат, удобный для восприятия пользователем. Компонент ввода и вывода информации 3, служит для взаимодействия системы с пользователем. Компонент реализации 5 необходим для осуществления процесса ПИД-регулирования, в котором происходит формирование единичного управляющего воздействия на исполнительный механизм, на основе оценки показаний единичного датчика.

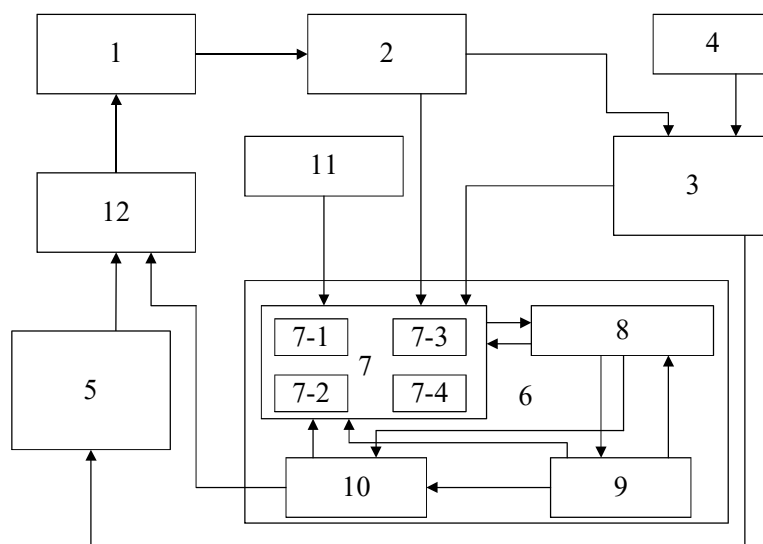


Рис. 1. Структура нейрорегулятора

Fig. 1. Structure of neuroregulator

Компонент управления 6 включает в себя блок истории 7, в который входят блок 7-1 сбора данных работы объекта управления, блок 7-2, который обрабатывает рабочий массив, блок 7-3 коэффициента эффективности и блок 7-4 сбора значений этих коэффициентов. Этот блок необходим для сбора информации о работе системы и создания выборок, а также для реализации расчета коэффициента эффективности, который представляет собой средневзвешенную ошибку (*Mean Squared Error, MSE*).

Компонент классификации данных 8 создает наборы информации с целью их последующей передачи на различные узлы регулятора, кроме того, обеспечивает оценку процесса принятия решений, на основе используемых нейросетевых алгоритмов. Постановка задачи управления сведена к минимизации средневзвешенной ошибки между заданными показателями управления и выходным результатом с нейросетевого регулятора, то есть оценка принятия решений управления системой сводится к задаче теории оптимизации. Оптимизация управления происходит по технологическим параметрам (частоте вращения, углу поворота и т.д.) с помощью алгоритма градиентного спуска.

Компонент анализа 9 осуществляет оценку текущего состояния управляемого объекта при применении определенного алгоритма управле-

ния. Оценка текущего состояния управляемого объекта основана на проведении моделирования выбранной стратегии управления и текущих технологических параметров объекта управления, переданных с блока 8 в виде сформированного и обработанного массива данных.

Компонент управления 10 является формирователем требуемого управляющего сигнала. Компонент управления 12 отвечает за оптимизацию стратегий достижения целей управления, кроме того, на основе результатов моделирования с блока 9 принимает решение о выборе оптимального закона регулирования, либо пропорционально-интегрально-дифференциальный, либо многопараметрический [3].

III. ПИД-регулятор нечеткого самонастраивающегося типа

ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциальный) и ПИ (пропорционально-интегральный) регуляторы часто встречаются в СУ электроприводами. Использование нейронных сетей совместно с ПИД- и ПИ-регуляторами позволяют адаптировать необходимые параметры под всевозможные условия работы. Нейронные сети имеют важную способность к самообучению и подстройке параметров функционирования СУ. Для снижения нелинейного воздействия на функционирование двигателя постоянного тока имеет смысл использовать самонастраивающийся нечеткий регулятор с ПИД структурой [4]. Схема СУ с использованием ПИД-регулятора нечеткого самонастраивающегося типа приведена на рис. 2.

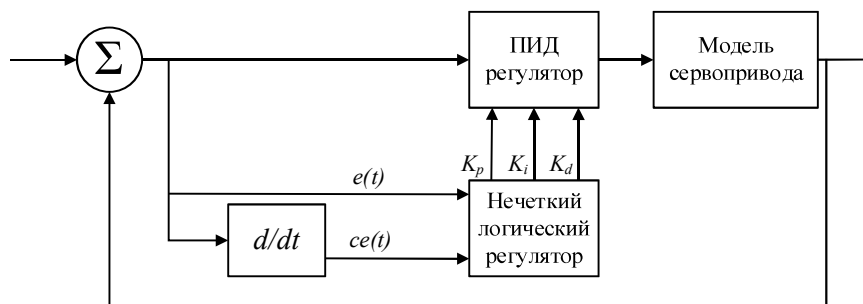


Рис. 2. СУ с содержанием ПИД-регулятора нечеткого самонастраивающегося типа

Fig. 2. Control system containing a fuzzy self-tuning PID controller

С целью проектирования регулятора нечеткого логического типа выбраны функции принадлежности входных и выходных переменных. Помимо этого, была сгенерирована база, которая содержит ряд правил типа «если...то». Входные и выходные переменные являются стандартными уни-

версумами, что позволяет избежать дополнительных ошибок в случае определения краевых точек универсума для каждого параметра на входе. При этом под понятием стандартный универсум будем иметь в виду универсум $[-1, 1]$. При использовании стандартного универсума необходимо внести изменения в СУ, которая включает в себя регулятор нечеткой логики, требуемый для преобразования выходных данных используемого регулятора.

Основной трудностью при создании такой системы является определение интервала изменения параметров используемого регулятора. Предлагается при проектировании самонастраивающегося ПИД-регулятора для классической его составляющей получить данные основанные на анализе частотной передаточной функции объекта управления и желаемой логарифмической амплитудно-частотной характеристики СУ, а базу знаний нечеткой составляющей формировать в пределах этих данных.

Поведение такого вида ПИД-регулятора при воздействии различных типов сигналов представлена на рис. 3.

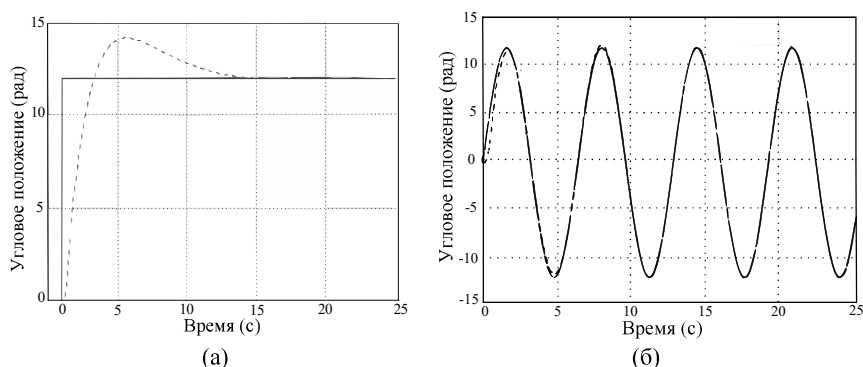


Рис. 3. Реакция адаптивного нечеткого регулятора на: входной ступенчатый сигнал (а) и синусоидальный входной сигнал (б)

Fig. 3. Adaptive fuzzy controller response to input step signal (a) and sinusoidal input (b)

В соответствии с рис. 3,а основные характеристика качества переходного процесса имеют следующие значения: перерегулирование $\sigma = 20,8 \%$; время регулирования $t_{\text{ин}} = 12,5 \text{ с.}$; ошибка регулирования $\xi = 0,008$. Для сравнения ПИД-регуляторов разных типов, рассмотренных в данной статье, при моделировании был использован ступенчатый входной сигнал 12 вольт, что является максимальным напряжением для сервопривода (рис. 2).

На рис. 3,б приведен график изменения положения сервопривода в зависимости от сигнала задания синусоидальной формы (сплошная линия — желаемая форма выходного сигнала изменения угла положения, штрих-

пунктирная – при использовании в СУ самонастраивающегося ПИД-регулятора). Данный сигнал (штрихпунктирная линия) был получен с выхода самонастраивающегося ПИД-регулятора (рис. 2) для оценки его работы, а именно – для проверки принципа адаптивности и самонастройки на основе правильности формирования базы знаний нечеткого логического регулятора.

Согласно представленным иллюстрациям, применение данных регуляторов неспособно предоставить возможность полностью и эффективно справиться с нелинейными воздействиями на двигатель постоянного тока. Большое значение перерегулирования для данного регулятора является отрицательным фактором. Нейросетевое управление и соответствующие алгоритмы управления должны исправить данную ситуацию, тем самым повысив качество управляющего процесса. При этом обучающими данными для нейросетевого ПИД-регулятора будут являться параметры классического ПИД-регулятора, а проверочными – данные с нечеткого логического регулятора.

IV. Нейросетевой ПИД-регулятор

В большом количестве работ затрагивается вопрос создания и улучшения качества управляющего процесса с использованием таких регуляторов [5-7]. Однако, в таком случае обеспечение желаемой точности обучения не предоставляется возможным. В качестве способа создания модели нейросетевого ПИД-регулятора был использован соответствующий инструмент *Neural Network Fitting Tool* в программе *Matlab*. Данный алгоритм позволит рассчитать ошибку, которая возникает в выходном слое, а также определить вектор градиента как функцию смещений и весов. В качестве цели используемого алгоритма стоит отметить настройку весовых коэффициентов нейросети, таким образом, чтобы при подаче на вход нейросети вектора входных значений позволило получить требуемый вектор выходных значений. Считается, что в процессе обучения нейросети каждый вектор входа будет соответствовать требуемому вектору выхода. В пространстве программного обеспечения *Matlab* расписаны входные и выходные данные используемого ПИД-регулятора и представлены в виде двумерных матриц [8]. Обученная нейросеть позволяет формировать управляющие воздействия в зависимости от требуемых входных значений, которые сформируют требуемое состояние управляемого объекта (рис. 4). После проведения процесса обучения нейросеть имеет название нейроэмулятора [9].

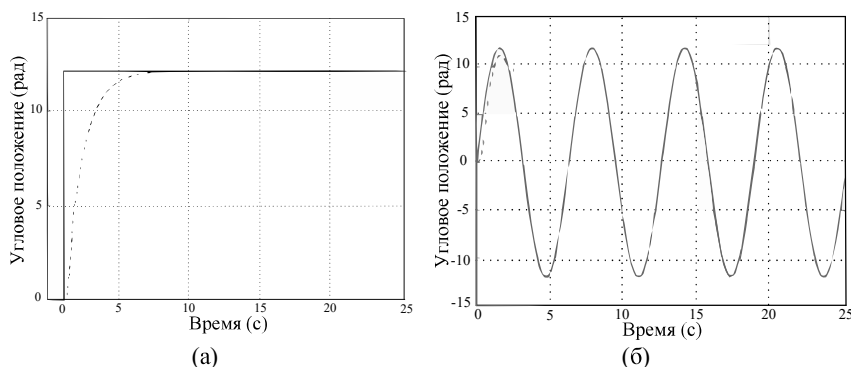


Рис. 4. Реакция нейросетевого регулятора на: входной ступенчатый сигнал (а) и синусоидальный входной сигнал (б)

Fig. 4. Neural network regulator response to input step signal (a) and sinusoidal input (b)

В соответствии с рис. 4,а, основные характеристика качества переходного процесса имеют следующие значения: перерегулирование $\sigma = 0\%$; время переходного процесса $t_{\text{пр}} = 8\text{ с}$; ошибка регулирования $\xi = 0,001$. Как видно из характеристик переходного процесса, ПИД-регулятор, настроенный с помощью нейросети, имеет наименьшие величины по сравнению с аналогичными, полученными при применении регулятора нечеткого самонастраивающегося типа, что повышает качество переходного процесса.

На рис. 4,б приведен график изменения положения сервопривода в зависимости от сигнала задания синусоидальной формы (сплошная линия – желаемая форма выходного сигнала изменения угла положения, штрихпунктирная – при использовании в СУ нейросетевого ПИД-регулятора). Данный результат подтверждает, что нейросетевой ПИД-регулятор позволяет добиться высокой точности воспроизведения задающего воздействия и ослабить влияние нелинейностей сервопривода. При этом важно отметить, что на такую точность влияет не только процесс обучения (количество эпох, функции активации, весовые коэффициенты и т.д.), но и архитектура нейросети (тип нейросети, количество внутренних слоев и количество нейронов на каждом из них). При моделировании исследуемого нейросетевого ПИД-регулятора обучение нейросети осуществлялось путем подачи сигналов различных амплитуд в диапазоне частот 0,5-2,5 рад/с.

Полученные результаты моделирования указывают на то, что нейросетевой ПИД-регулятор может быть использован в различных СУ управления электродвигателями. При этом для обеспечения требуемой точ-

ности и достижения лучших качественных показателей работы электропривода, нейросетевую составляющую ПИД-регулятора обучить нелинейным статическим и динамическим характеристикам объекта управления.

Нейросетевое управление позволяет решать огромный спектр задач, начиная от управления и заканчивая распознаванием речи, образов и др. [10]. Сейчас установлено, что искусственные нейронные сети, обладающие большим потенциалом и эффективностью, которые позволяют достигнуть огромных результатов в работе СУ [11].

V. Заключение

Настройка регуляторов с помощью использования интеллектуальных методов позволит снизить влияние нелинейных воздействий на работу используемой СУ. СУ с регуляторами на основе обученных нейронных сетей демонстрируют высокую точность при работе с гармоническим сигналом различной частоты, что в целом улучшает функционирование систем в целом. Применение нейросетевого регулятора в автоматической СУ существенно повышает качество и скорость переходных процессов. Кроме того, такой регулятор адаптируется под различные режимы работы, способствует улучшению энергоэффективности и повышению надежности технического процесса. В результате нейросетевой регулятор становится ценным инструментом в современной инженерной практике и промышленности.

© Старостина Я.К., 2024

© Токарев А.Д., 2024

© Поснов Д.Д., 2024

Поступила в редакцию 20.06.2024

Принята к публикации 28.08.2024

Received 20.06.2024

Accepted 28.08.2024

Библиографический список

- [1] Бойматов И.А., Бойматов А.А., Рузаева Н.А. Разработка и внедрение нейросетевого регулятора в систему автоматизации блочной кустовой насосной станции (БКНС) // Межд. науч.-практ. конф. «Новые информационные технологии и системы в решении задач инновационного развития», Май 27, 2021, Казань, Россия. Казань: ООО «Омега Сайнс», 2021. С. 9-12.
- [2] Билинский Ю.А. Синтез нейросетевого регулятора для управления режимом работы погружного двигателя // Межд. науч.-практ. конф. «Новые технологии – нефтегазовому региону», Май 16-20, 2016, Тюмень, Россия. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2016. С. 17-20.
- [3] Хапкин Д.Л., Феофилов С.В., Козырь А.В. Синтез нейросетевых регуляторов с гарантией устойчивости и качества переходного процесса //15-я Межд. науч.-

- тех. конф. «Приборостроение-2022», Ноябрь 16-18, 2022, Минск, Беларусь: БНТУ, 2022. С. 122-124.
- [4] Котелева Н.И., Васильева Н.В. Нейросетевой регулятор для управления сложным технологическим процессом // Записки Горного института. 2013. Т. 202. С. 254-256.
- [5] Жилон Р.А. Постройка ПИД-регулятора с использованием нейронных сетей // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 5 (109). С. 38-47. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-38-47
- [6] Lyshevski S.E. Nonlinear control of mechatronic systems with permanent-magnet DC motors // *Mechatronics*. 1999. № 9 (5). P. 539-552. DOI: 10.1016/S0957-4158(99)00014-8
- [7] Ezema E.E., Eneh I.I. Improving the functional limitations of DC motor using neural network controller // *International journal of Computer technology and electronics engineering (IJCTEE)*. 2013. № 3 (5).
- [8] Бобиков А.И., Бозванов А.О. Нейросетевое управление угловым положением двигателя постоянного тока // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 57. С. 139-144. DOI: 10.21667/1995-4565-2016-57-3-139-144
- [9] Поснов Д.Д., Токарев А.Д. Структура и особенности управления нейрорегуляторами // III Всерос. с межд. уч. молодежной конф. «Бутаковские чтения», Декабрь 12-14, 2023, Томск, Россия: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. С. 152-154.
- [10] Шипагин В.И. Нейросетевая реализация регулятора для устойчивого объекта // Сборник научных трудов Новосибирского Государственного Технического Университета. 2019. № 3-4 (96). С. 53-63. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-53-63
- [11] Феофилов С.В., Хапкин Д.Л. Базовый синтез нейросетевых регуляторов для следящих систем управления // Известия Тульского Государственного Университета. Технические науки. 2020. № 11. С. 256-261.

References

- [1] I.A. Boimatov, A.A. Boimatov and N.A. Ruzaeva, "Razrabotka i vnedrenie nejrosetevogo regulatora v sistemu avtomatizacii blochnoj kustovoj nasosnoj stancii (BKNS) [Development and implementation of a neural network regulator in the automation system of a block cluster pumping station (BKNS)]", in proc. *Int. sci.-pract. conf. "Novye informacionnye tekhnologii i sistemy v reshenii zadach innovacionnogo razvitiya [New information technologies and systems in solving problems of innovative development]"*, May 27, 2021, Kazan, Russia, pp. 9-12 (in Russian).
- [2] Yu.A. Bilinsky, "Sintez nejrosetevogo regulatora dlya upravleniya rezhimom raboty pogruzhnogo dvigatelya [Synthesis of a neural network regulator for controlling the operating mode of a submersible engine]", in proc. *Int. sci.-pract. conf. "Novye tekhnologii – neftegazovomu region [New technologies - to the oil and gas region]"*, May 16-20, 2016, Tyumen, Russia, pp. 17-20 (in Russian).
- [3] D.L. Khapkin, S.V. Feofilov and A.V. Kozyr, "Synthesis of neural network regulators with guarantee of stability and quality of the transition process", in proc. *15th Int. sci.-*

- tech. conf. "Instrumentation engineering-2022", Nov. 16-18, 2022, Minsk, Belarus, pp. 122-124.
- [4] N.I. Koteleva and N.V. Vasilyeva, "Neuronet controller design for complex technological processes", *Journal of Mining Institute*, vol. 202, pp. 254-256, 2013.
- [5] R.A. Zhilov, "Building a PID controller using neural networks", *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*, vol. 5, no. 109, pp. 38-47, 2022. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-38-47
- [6] S.E. Lyshevski, "Nonlinear control of mechatronic systems with permanent-magnet DC motors", *Mechatronics*, vol. 9, no. 5, pp. 539-552, Aug. 1999. DOI: 10.1016/S0957-4158(99)00014-8
- [7] E.E. Ezema and I.I. Eneh, "Improving the functional limitations of DC motor using neural network controller", *International journal of Computer technology and electronics engineering (IJCTEE)*, vol. 3, no. 5, Oct. 2013.
- [8] A.I. Bobikov and A.O. Bozvanov, "Neural network position control of DC motor", *Vestnik of Ryazan state radio engineering university*, no. 57, pp. 139-144, 2016. DOI: 10.21667/1995-4565-2016-57-3-139-144
- [9] D.D. Posnov and A.D. Tokarev, "Struktura i osobennosti upravleniya nejroregulyatorami [Structure and features of neuroregulator management]", in proc. *III All-Russian with int. academic. youth conf. "Butakovskie chteniya [Butakovskie readings]"*, Dec. 12-14, 2023, Tomsk, Russia, pp. 152-154 (in Russian).
- [10] V.I. Shipagin, "Neural network implementation of a controller for a stable object", *Transaction of Scientific Papers of the Novosibirsk State Technical University*, vol. 3-4, no. 96, pp. 53-63, 2019. DOI: 10.17212/2307-6879-2019-3-4-53-63
- [11] S.V. Feofilov and D.L. Khapkin, "Basic synthesis of neural network regulators for following control systems", *News of Tula State University. Technical Sciences*, no. 11, pp. 256-261, 2020.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

- Старостина Ярослава Константиновна**, кандидат технических наук, доцент Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация. **Yaroslava K. Starostina**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation.
- Токарев Андрей Дмитриевич**, магистрант Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация. **Andrey D. Tokarev**, master of the Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation.
- Поснов Данила Дмитриевич**, магистрант Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация. **Danila D. Posnov**, master of the Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation.