

<https://doi.org/10.32603/2071-8985-2024-17-9-91-99>

## Разработка учебно-исследовательского комплекса «Искусственный интеллект в системах управления, защиты и автоматике электрических сетей»

М. Г. Баширов, Р. Г. Вильданов<sup>✉</sup>, Е. А. Исаев,  
А. А. Сабирьянова, Д. В. Фокин

Институт нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного  
технического университета, Салават, Россия

<sup>✉</sup> vildanov.rauf@yandex.ru

**Аннотация.** Рассматривается научная проблема ограничений в использовании искусственного интеллекта в релейной защите. Рассмотрены работы отечественных и зарубежных авторов по данной тематике. Авторы дополнили лабораторный стенд с физическими моделями системы электроснабжения цифровым двойником, искусственной нейронной сетью и исследовали комплекс с целью получить ответ на некоторые вопросы применения нейронной сети в релейной защите. Показано, что при работе в составе токовой защиты искусственная нейронная сеть имеет высокую точность, но требует строгой оценки рисков.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, искусственный интеллект, машинное обучение, учебно-исследовательский комплекс, цифровой двойник, релейная защита

**Для цитирования:** Разработка учебно-исследовательского комплекса «Искусственный интеллект в системах управления, защиты и автоматике электрических сетей» / М. Г. Баширов, Р. Г. Вильданов, Е. А. Исаев, А. А. Сабирьянова, Д. В. Фокин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 9. С. 91–99. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-9-91-99.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** Работы по созданию учебно-исследовательского комплекса выполнены в соответствии с Программой развития Уфимского государственного нефтяного технического университета на 2021–2030 гг. в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет–2030».

Original article

## Development of the Educational and Research Complex «Artificial Intelligence in Control and Protection Systems and Automation of Electrical Networks»

M. G. Bashirov, R. G. Vildanov<sup>✉</sup>, E. A. Isaev, A. A. Sabiryanova, D. V. Fokin

Institute of Petroleum Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum  
Technological University, Salavat, Russia

<sup>✉</sup> vildanov.rauf@yandex.ru

**Abstract.** The article deals with the scientific problem of limitations in the use of artificial intelligence in relay protection. The works of domestic and foreign authors on this topic are considered. The authors supplemented the laboratory stand with physical models of the power supply system with a digital double, an artificial neural network and investigated the complex in order to get an answer to some questions about the use of a neural network in relay protection. It is shown that when working as part of current protection, an artificial neural network has high accuracy, but requires a strict risk assessment.

**Keywords:** neural network, artificial intelligence, machine learning, educational and research complex, digital twin, relay protection

**For citation:** Development of the Educational and Research Complex «Artificial Intelligence in Control and Protection Systems and Automation of Electrical Networks» / M. G. Bashirov, R. G. Vildanov, E. A. Isaev, A. A. Sabiryanova, D. V. Fokin // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 9. P. 91–99. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-9-91-99.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Funding:** The work on the creation of the educational and research complex was carried out in accordance with the Development Program of Ufa State Petroleum Technological University for 2021–2030 as part of the implementation of the strategic academic leadership program «Priority–2030».

**Введение.** Несмотря на свою незначительность на первый взгляд, технические нарушения в системе релейной защиты энергетических сетей могут иметь далеко идущие последствия и вызвать значительный ущерб на федеральном уровне. Даже мелкие ошибки в настройках или неполадки в релейной защите могут привести к цепной реакции, затрагивающей различные части энергетической сети. Это может вызвать сбои в работе подстанций, перегрузку линий передачи и, в конечном итоге, спровоцировать крупные отключения электроэнергии, а следовательно, отключения функционирующих сегментов сети, создавая хаос и потенциально повышая риск серьезных аварий.

**Постановка задачи.** Стоит ли пытаться использовать искусственный интеллект там, где существует риск значительного ущерба на федеральном уровне? Должны ли мы использовать искусственный интеллект в релейной защите, учитывая последствия ошибок?

Изучим работы отечественных и зарубежных специалистов по искусственному интеллекту.

В [1] использован искусственный интеллект и достигнуто малое время отклика защиты. Разработанная система входные данные берет без повторения процесса обучения, чем достигается лучшее время отклика.

В [2] предложено применить искусственную нейронную сеть (ИНС) для распознавания межвитковых замыканий в трансформаторах. Для исследования работы трансформатора в системе электроснабжения в нормальном режиме, а также при межвитковых замыканиях разработаны цифровые модели. По результатам исследования получен большой объем входных данных, служащих для обучения ИНС.

В [3] автор работает с одной из типовых защит для силового трансформатора и делает успешную попытку ускорения работы искусственного интеллекта за счет объединения входных данных. Объединение данных привело к повышению скорости отклика и уменьшению по-

грешности, что было подтверждено при работе в различных режимах. Показано, что повышение скорости отклика и уменьшение погрешности искусственного интеллекта сопровождается повышением надежности.

Авторы [4] изучили типовую защиту цехового трансформатора, для которой была разработана ИНС с большим числом уровней. Каждый уровень отвечает за выполнение своей конкретной задачи. Одна из наиболее важных задач – обнаружение повреждения. Другой уровень использовался для классификации повреждений. Для подготовки к работе ИНС применены стандартные методы обучения с использованием искусственного интеллекта. Если для одного уровня применены методы искусственного интеллекта при обучении, то на другом уровне обучение осуществлялось методом обратного распространения ошибки.

Как показано в [5], искусственный интеллект может быть использован не для формирования управляющих воздействий в ступенях токовой защиты, а для моделирования процесса срабатывания второй ступени токовой защиты в силовом трансформаторе распределительной трансформаторной подстанции.

В [6] рассмотрено применение ИНС – алгоритмов для обнаружения вторжений в работу цифровой подстанции.

Авторы [7] проанализировали возможность применения рекуррентных ИНС для определения уставки срабатывания защит.

В [8] выполнено ИНС – моделирование релейной защиты со временем выдержки.

В [9] на основании наиболее удачных решений предложена структура ИНС. Полученная нейронная сеть использована для классификации режимов работы электрической сети на нормальные и аварийные с выявлением поврежденного элемента и вида повреждения. Работоспособность ИНС доказана пробным выполнением на модели системы электроснабжения.



шение на включение. Перед началом работы двойник включается автоматическим выключателем для подачи питания.

В рамках проекта реализованы цифровые двойники токовых защит, защиты от однофазных замыканий на землю, дифференциальных защит линии электропередачи и трансформатора. Реализация цифрового двойника дифференциальной защиты трансформатора имеет ряд особенностей.

Цифровой двойник дифференциальной защиты трансформатора представляет собой цифровую модель трансформатора, которая непрерывно отслеживает его параметры и состояние. Это позволяет более точно и детально контролировать процессы в трансформаторе.

Цифровой двойник использует специализированные алгоритмы и методы обработки данных для анализа тока и напряжения, поступающих от трансформатора. Это позволяет выявлять различные повреждения трансформатора. Цифровой двойник может быть легко интегрирован с системой управления лабораторного стенда, что снижает риск повреждения трансформатора и обеспечивает непрерывность работы электрической сети. В процессе выполнения лабораторной работы с цифровым двойником обучающиеся рассчитывают ток срабатывания реле и чувствительность защиты. Определяются токи на высокой и низкой сторонах защищаемого трансформатора в номинальном режиме работы. Затем выбираются трансформаторы тока и определяются соответствующие токи защиты. Рассчитываются токи короткого замыкания в расчетных точках. Определяется ток небаланса, приведенный к стороне высокого напряжения по двум составляющим тока небаланса, без учета третьей составляющей, причем первая составляющая обусловлена погрешностью трансформаторов тока, а вторая – наличием устройства регулирования напряжения у силового трансформатора.

Далее произведением коэффициента надежности на ток небаланса определяется предварительная установка защиты, рассчитанная по условию отстройки от тока небаланса. Затем делением минимального тока реле на значение тока срабатывания реле проверяется чувствительность защиты. Коэффициент чувствительности должен быть больше двух.

На рис. 2 представлено окно двойника физического стенда, выполненное в программе разработки графических интерфейсов qt designer.

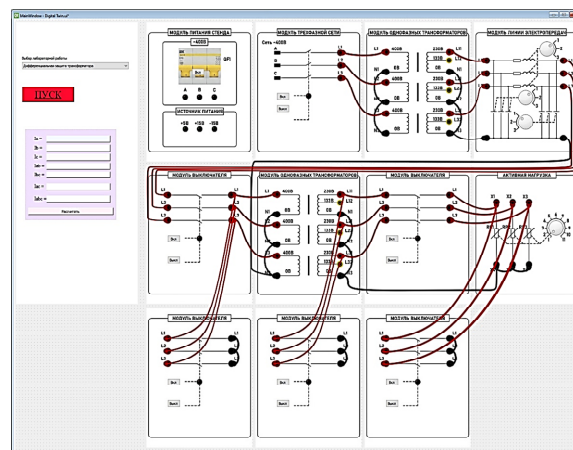


Рис. 2. Окно двойника физического стенда  
Fig. 2. The window of the physical stand's double

Разработка и обучение нейронной сети выполняются для выбора одной из пяти защит – токовая отсечка (ТО), МТЗ с независимой выдержкой времени, защита от ОЗЗ, продольная дифференциальная защита кабельных линий и дифференциальная защита трехфазного силового трансформатора и выработки управляющего воздействия на отключение поврежденного элемента [15].

Функционирование интеллектуальной системы защиты рассмотрим на примере дифференциальной защиты трансформатора цифрового двойника лабораторного стенда.

Для обучения нейронной сети выбран принцип обучения «с учителем», – регрессия.

Для обучения была подготовлена выборка данных, часть которых была отделена для тестирования. Набор данных представляет собой вектор, содержащий результат расчета цифрового двойника, конкретно – значения токов отдельных фаз и межфазных замыканий. Посредством запуска цифрового двойника в циклическом режиме для всех возможных значений была сформирована минимально необходимая для решения поставленной задачи база данных.

При экспериментальном исследовании релейных защит на формируется база данных для обучения искусственной нейронной сети. Цифровой двойник, располагающий регрессионной моделью ИНС, обрабатывает входные данные и выдает вероятностные значения параметров защит. Эти входные данные служат базой для формирования сигнала в систему управления, которая распознает вид повреждения и вырабатывает управляющие воздействия.

После ввода соответствующих данных и нажатия кнопки «Рассчитать» программа обращается к обученной интеллектуальной модели и

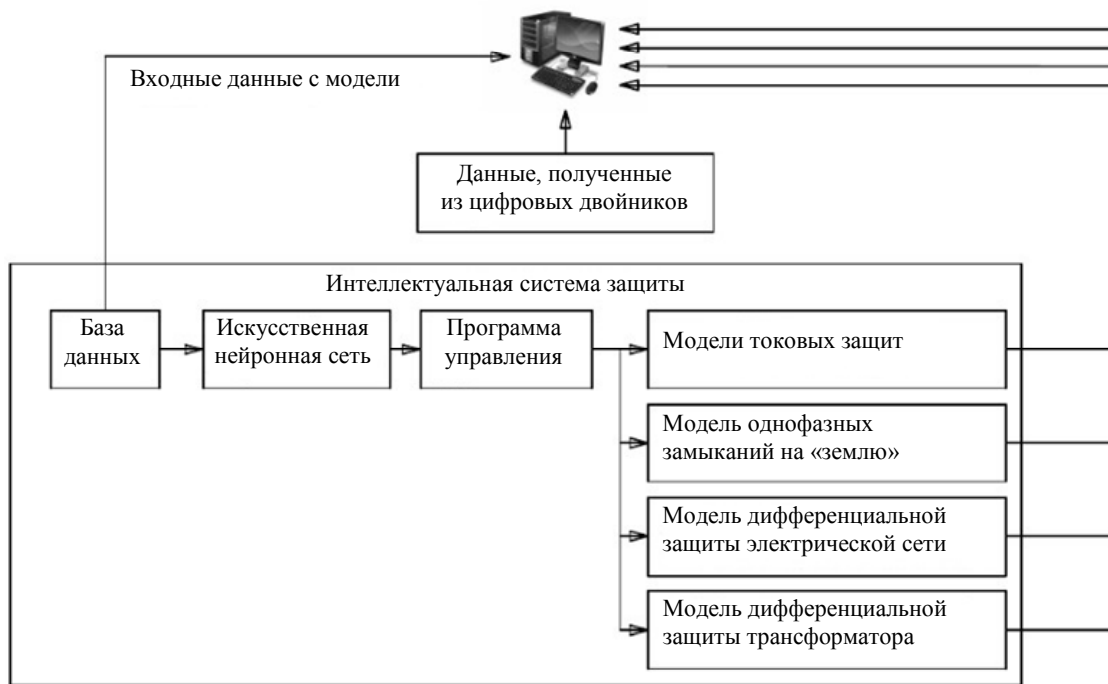


Рис. 3. Функциональная схема интеллектуальной системы  
 Fig. 3. Functional diagram of an intelligent system

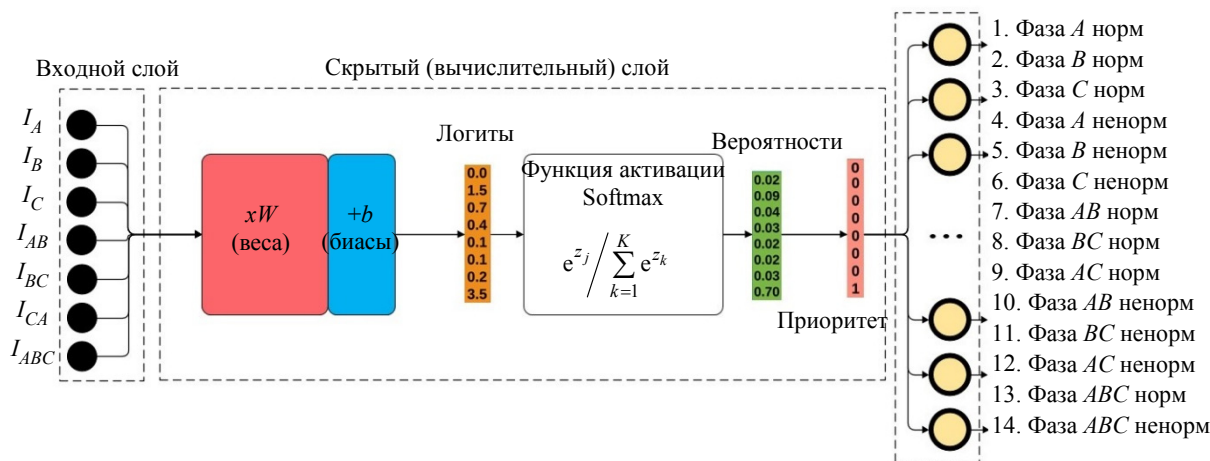


Рис. 4. Структура вычислительного слоя нейронной сети  
 Fig. 4. The structure of the computational layer of the neural network

производит расчет, в результате которого определяет, уставки какой защиты превышены в данный момент времени, и формирует управляющий сигнал на отключение.

На рис. 3 представлена функциональная схема интеллектуальной системы.

Регрессионная модель ИНС обрабатывает входные данные и выдает вероятностные значения параметров конкретных защит. На основании этих значений формируется сигнал в систему защиты. Структура вычислительного слоя нейронной сети показана на рис. 4.

Нейронная сеть содержит три слоя: входной, вычислительный и выходной. Входной слой служит для приема данных. Каждое значение входных данных отвечает за один из входных признаков данных.

Количество нейронов во входном слое равно количеству признаков в исходных данных. Вычислительный слой реализует вычислительную функцию и непосредственно реализует функции нейронной сети. Выходной слой предназначен для формирования выходных данных. Каждому типу задач соответствует свое количество нейронов в выходном слое.

Выборка данных формируется в виде таблицы для последующей загрузки в искусственную нейронную сеть для ее обучения. Для разработки искусственной нейронной сети для учебно-исследовательского комплекса используется язык программирования высокого уровня. Одно экспериментальное измерение дает одну строку выборки.

В качестве инструмента разработки нейронной сети была выбрана библиотека TensorFlow.

Результаты исследования ИНС на токовой защите при использовании 450 наборов значений обучающей выборки приведены в таблице.

Результаты исследования ИНС на токовой защите  
The results of the INS study on current protection

Наименование показателя	Значения параметра ИНС
Коэффициент ошибок (обучающая выборка)	0.059
Коэффициент ошибок (тестовая выборка)	0.128
Ложные срабатывания при обучении, %	5.45
Ложные срабатывания при тестировании, %	6.02

**Обсуждение результатов.** Эффективность релейной защиты систем электроснабжения остается довольно низкой, например релейная защита силового трансформатора в 20–30 % случаев повреждений срабатывает ложно или не срабатывает вовсе, поэтому не предотвращает развитие аварии [16]. При этом доля правильных срабатываний составит 0.7...0.8. Одна из главных проблем в защитах трансформаторов состоит в распознавании межвитковых замыканий в обмотке, характеризующихся малыми токами замыкания. Искусственный интеллект должен стать перспективным направлением развития релейной защиты и автоматики, так как они имеют меньшее количество ложных срабатываний по сравнению с электромеханическими защитами

Использование ИНС в релейной защите имеет потенциал улучшить эффективность и надежность системы защиты, но требует строгой оценки рисков, обеспечения безопасности и внимательного управления, чтобы обеспечить эффективное функционирование системы.

По таблице видна близость коэффициентов ошибок по обучающей выборке (0.059) и по те-

стовой выборке (0.128), что служит признаком грамотного обучения ИНС, так как ИНС примерно одинаково хорошо работает с данными, которые она раньше видела при обучении, и с данными, которые она видит впервые. Число ложных срабатываний в обучающей выборке составило 5.45 %, на тестовой – 6.02 %.

При расчете тока срабатывания реле и чувствительности защиты используются соответствующие формулы, по которым можно определить, какие погрешности они могут внести при распознавании повреждений. В расчетах присутствует коэффициент трансформации  $n_T$ , который имеет погрешность, не превышающую 10 %. При расчете числа витков обмоток, которое округляется до целых значений как в цифровом двойнике, так и в физических электросетях. Таким образом, и в этом случае точность ИНС оценивается объективно и не искажается при вычислениях.

**Выводы.** При работе в составе токовой защиты ИНС имеют высокую точность. Ошибки в работе максимальной токовой защиты возникают тогда, когда значения тока мало отличаются от уставки. Если ток хотя бы на одной из фаз существенно отличается от уставки, ИНС обеспечивает 100 % распознавание.

Число ложных срабатываний на тестовой выборке составило 6.02 %. В условиях зашумленности доля ложных срабатываний релейной защиты с ИНС возрастет на 10 % [17]. С учетом увеличения числа ложных срабатываний на 10 % из-за зашумленности доля ложных срабатываний достигнет 16.02 %. В нашем случае в релейной защите с ИНС достигнуто уменьшение доли ложных срабатываний на 3.98–13.98 %. Соответственно, точность релейной защиты с ИНС повысилась до 0.8602. Здесь диапазон 0.7...0.8 – это точность распознавания повреждений в релейной защите без ИНС.

#### Список литературы

1. Tripathy M., Maheshwari R. P., Verma H. K. Neuro-fuzzy technique for power transformer protection // *Elect. Power Components and Systems*. 2008. Vol. 36, № 3. P. 299–316. doi: 10.1080/15325000701603967.

2. Куликов А. Л., Лоскутов А. А., Совина А. Н. Использование машинного обучения и искусственных нейронных сетей для распознавания витковых замыканий в силовых трансформаторах // *Электричество*. 2022. № 10. С. 34–44. doi: 10.24160/0013-5380-2022-10-34-44.

3. Integration of accelerated deep neural network into power transformer differential protection / Sh. Afrasiabi, M. Afrasiabi, B. Parang, M. Mohammadi // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. Vol. 16, № 2. P. 865–876. doi: 10.1109/TII.2019.2929744.

4. Vishwakarma D. N., Balaga H., Nath H. Application of genetic algorithm trained masterslave Neural Network for differential protection of power transformer // 2014 9<sup>th</sup> Intern. Conf. on Computer Engin. & Systems (ICCES). Cairo, Egypt: IEEE, 2014. P. 164–169.

5. Ivanov S., Nikandrov M., Lariukhin A. Neuro algorithm accuracy evaluation for the anomalies detecting in overcurrent protection operation // *Intern. Ural Conf. on*

Elect. Power Engin. (UralCon). Magnitogorsk, Russ. Fed.: IEEE, 2021. P. 116–120. doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559614.

6. Кокшев П. А. Применение нейросетевых алгоритмов обнаружения вторжений для сетевого анализатора данных цифровой подстанции современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики // Сб. тр. науч.-техн. конф. молодых специалистов форума «РЕЛАВЭКСПО-2021». Чебоксары: изд-во ЧувашГУ им. И. Н. Ульянова, 2021. С. 199–203.

7. Ахмедова О. О., Сошинов А. Г., Атрашенко О. С. Анализ возможности применения рекуррентных нейронных сетей для определения уставки срабатывания защит дальнего резервирования // Электроэнергия. Передача и распределение. 2022. № 4(73). С. 66–71.

8. Иванов С. О., Никандров М. В., Славутский Л. А. Нейросетевое моделирование релейной защиты с временной задержкой // Электротехника и энергетика. Вест. Чувашского ун-та. 2022. № 3. С. 53–60.

9. Кокорин Е. Л., Чайкин В. С., Дмитриев С. А. Анализ возможности применения нейронных сетей для реализации алгоритмов РЗИА // Релейщик. 2020. № 2(37). С. 8–14.

10. Николаева О. О., Климова Т. Г. Применение нейронных сетей и алгоритмов оптимизации для определения параметров АРВ синхронного генератора // Релейщик. 2020. № 2. С. 16–23.

11. Титова А. В., Сучкова М. Ю. Цифровые двойники в повышении качества образовательных услуг // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2021. № 4(58). С. 57–63.

12. Вихман В. В., Ромм М. В. Цифровые двойники в образовании: перспективы и реальность // Высш. образование в России. 2021. Т. 30, № 2. С. 22–32.

13. Перухин М. Ю., Васильева М. Ю., Кадырова Г. К. Цифровой двойник лаборатории систем управления химико-технологическими процессами // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 6 (ч. 1). С. 84–90.

14. Применение возможностей виртуальных лабораторий в учебном процессе технического вуза / Б. М. Саданова, А. В. Олейникова, И. В. Альберти, Е. А. Одинцова, Е. Н. Плеханова // Молодой ученый. 2016. № 4(108). С. 71–74.

15. Разработка цифрового двойника учебного лабораторного комплекса «Интеллектуальная система энергоснабжения предприятия» / М. Г. Баширов, М. Ф. Шван, Э. И. Ахметшина, А. Ф. Хакимов // Components of Scientific and Technol. Progress. 2023. № 6(84). С. 138–141.

16. Гуревич В. И. Надежность микропроцессорных устройств релейной защиты: мифы и реальность / Проблемы энергетики. 2008. № 5–6. С. 47–62.

17. Борисов Р. К. Невнимание к проблеме ЭМС может обернуться катастрофой // Новости электротехники. 2001. № 6(12). С. 128–129.

#### Информация об авторах

**Баширов Мусса Гумерович** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета. ул. Губкина, 22Б, г. Салават, Республика Башкортостан, 453250, Россия.

E-mail: earr@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7493-6803>

**Вильданов Рауф Гибадуллович** – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета. ул. Губкина, 22Б, г. Салават, Республика Башкортостан, 453250, Россия.

E-mail: vildanov.rauf@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3977-046X>

**Исаев Евгений Александрович** – магистрант 2-го курса кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета. ул. Губкина, 22Б, г. Салават, Республика Башкортостан, 453250, Россия.

E-mail: el.3v3n@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0001-8388-191X>

**Сабирьянова Айгуль Аликовна** – магистрант 2-го курса кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета. ул. Губкина, 22Б, г. Салават, Республика Башкортостан, 453250, Россия.

E-mail: sabiryanova.a@inbox.ru

<https://orcid.org/0009-0002-5659-5069>

**Фокин Данил Вячеславович** – магистрант 2-го курса кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета. ул. Губкина, 22Б, г. Салават, Республика Башкортостан, 453250, Россия.  
E-mail: 47sd20@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0001-6538-8224>

#### Вклад авторов:

Баширов М. Г. – руководство творческим коллективом.  
Вильданов Р. Г. – написание текста статьи.  
Исаев Е. А. – написание кода нейронной сети.  
Сабириянова А. А. – разработка функциональной схемы и интерфейса.  
Фокин Д. В. – написание кода цифрового двойника.

#### References

1. Tripathy M., Maheshwari R. P., Verma H. K. Neuro-fuzzy technique for power transformer protection // *Elect. Power Components and Systems*. 2008. Vol. 36, № 3. P. 299–316. doi: 10.1080/15325000701603967.
2. Kulikov A. L., Loskutov A. A., Sovina A. N. Ispol'zovanie mashinnogo obucheniya i iskusstvennykh neyronnykh setej dlja raspoznavaniya vitkovykh замыканий v silovykh transformatorah // *Jelektrichestvo*. 2022. № 10. S. 34–44. doi: 10.24160/0013-5380-2022-10-34-44. (In Russ.).
3. Integration of accelerated deep neural network into power transformer differential protection / Sh. Afrasiabi, M. Afrasiabi, B. Parang, M. Mohammadi // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. Vol. 16, № 2. P. 865–876. doi: 10.1109/TII.2019.2929744.
4. Vishwakarma D. N., Balaga H., Nath H. Application of genetic algorithm trained masterslave Neural Network for differential protection of power transformer // 2014 9<sup>th</sup> Intern. Conf. on Computer Engin. & Systems (ICCES). Cairo, Egypt: IEEE, 2014. P. 164–169.
5. Ivanov S., Nikandrov M., Lariukhin A. Neuro algorithm accuracy evaluation for the anomalies detecting in overcurrent protection operation // *Intern. Ural Conf. on Elect. Power Engin. (UralCon)*. Magnitogorsk, Russ. Fed.: IEEE, 2021. P. 116–120. doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559614.
6. Kokshev P. A. Primenenie nejrosetevykh algoritmov obnaruzheniya vtorzhenij dlja setevogo analizatora dannykh cifrovoj podstancii sovremennye tendencii razvitiya cifrovyykh sistem relejnoj zashhity i avtomatiki // *Sb. tr. nauch.-tehn. konf. molodykh specialistov foruma «RELAVJeKSP0-2021»*. Cheboksary: izd-vo ChuvashGU im. I. N. Ul'janova, 2021. S. 199–203. (In Russ.).
7. Ahmedova O. O., Soshinov A. G., Atrashenko O. S. Analiz vozmozhnosti primeneniya rekurrentnykh neyronnykh setej dlja opredeleniya ustavki srbatyvaniya zashhit dal'nego rezervirovaniya // *Jelektrojenergija. Peredacha i raspredelenie*. 2022. № 4(73). S. 66–71. (In Russ.).
8. Ivanov S. O., Nikandrov M. V., Slavutskij L. A. Nejrosetevoe modelirovanie relejnoj zashhity s vremennoj zaderzhkoj // *Jelektrotehnika i jenergetika. Vestn. Chuvashskogo un-ta*. 2022. № 3. S. 53–60. (In Russ.).
9. Kokorin, E. L., Chajkin V. S., Dmitriev S. A. Analiz vozmozhnosti primeneniya neyronnykh setej dlja realizacii algoritmov RZiA // *Relejshhik*. 2020. № 2(37). S. 8–14. (In Russ.).
10. Nikolaeva O. O., Klimova T. G. Primenenie neyronnykh setej i algoritmov optimizacii dlja opredeleniya parametrov ARV sinhronnogo generatora // *Relejshhik*. 2020. № 2. S. 16–23. (In Russ.).
11. Titova A. V., Suchkova M. Ju. Cifrovye dvojniki v povyshenii kachestva obrazovatel'nykh uslug // *Tehniko-tehnologicheskie problemy servisa*. 2021. № 4(58). S. 57–63. (In Russ.).
12. Vihman V. V., Romm M. V. Cifrovye dvojniki v obrazovanii: perspektivy i real'nost' // *Vyssh. obrazovanie v Rossii*. 2021. T. 30, № 2. S. 22–32. (In Russ.).
13. Peruhin M. Ju., Vasil'eva M. Ju., Kadyrova G. K. Cifrovoy dvojniki laboratorii sistem upravleniya himiko-tehnologicheskimi processami // *Sovremennye naukoemkie tehnologii*. 2021. № 6 (ch. 1). S. 84–90. (In Russ.).
14. Primenenie vozmozhnostej virtual'nykh laboratorij v uchebnom processe tehnikeskogo vuza / B. M. Sadanova, A. V. Olejnikova, I. V. Al'berti, E. A. Odincova, E. N. Plehanova // *Molodoj uchenyj*. 2016. № 4(108). S. 71–74. (In Russ.).
15. Razrabotka cifrovogo dvojnika uchebnogo laboratornogo kompleksa «Intellectual'naja sistema jenergo-snbzheniya predpriyatija» / M. G. Bashirov, M. F. Shvan, Je. I. Ahmetshina, A. F. Hakimov // *Components of Scientific and Technol. Progress*. 2023. № 6(84). S. 138–141. (In Russ.).
16. Gurevich V. I. Nadezhnost' mikroprocessornykh ustroystv relejnoj zashhity: mify i real'nost' / *Problemy jenergetiki*. 2008. № 5–6. S. 47–62. (In Russ.).
17. Borisov R. K. Nevnimanie k probleme JeMS mozhet obernut'sja katastrofoj // *Novosti jelektrotehniki*. 2001. № 6(12). S. 128–129. (In Russ.).

#### Information about the authors

**Mussa G. Bashirov** – Dr Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises at the Institute of Oil Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technological University. Gubkina St., 22B, Salavat, Republic of Bashkortostan, 453250, Russia.  
E-mail: eapp@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7493-6803>



**Rauf G. Vildanov** – Dr Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises at the Institute of Oil Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technological University. Gubkina St., 22B, Salavat, Republic of Bashkortostan, 453250, Russia.  
E-mail: vildanov.rauf@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3977-046X>

**Evgeniy A. Isaev** – 2<sup>nd</sup> year undergraduate student of the Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises at the Institute of Oil Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technological University. Gubkina St., 22B, Salavat, Republic of Bashkortostan, 453250, Russia.  
E-mail: el.3v3n@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0001-8388-191X>

**Aigul A. Sabiryanova** – 2<sup>nd</sup> year undergraduate student of the Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises at the Institute of Oil Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technological University. Gubkina St., 22B, Salavat, Republic of Bashkortostan, 453250, Russia.  
E-mail: sabiryanova.a@inbox.ru  
<https://orcid.org/0009-0002-5659-5069>

**Danil V. Fokin** – 2<sup>nd</sup> year undergraduate student of the Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises at the Institute of Oil Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technological University. Gubkina St., 22B, Salavat, Republic of Bashkortostan, 453250, Russia.  
E-mail: 47sd20@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0001-6538-8224>

**Contribution of the authors:**

Bashirov M. G. – leadership of the creative team.

Vildanov R. G. – writing the text of the article.

Isaev E. A. – writing the code of a neural network.

Sabiryanova A. A. – development of a functional scheme and interface.

Fokin D. V. – writing the code of a digital double.

Статья поступила в редакцию 24.12.2023; принята к публикации после рецензирования 09.09.2024; опубликована онлайн 25.11.2024.

Submitted 24.12.2023; accepted 09.09.2024; published online 25.11.2024.

---