

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2023.4.01

УДК 621.311

**М.Г. Баширов, И.Г. Юсупова, О.Г. Волкова, М.Ф. Шван,
Н.Н. Даминов, К.В. Кузнецов, Т.Р. Сагитов**

Институт нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного
нефтяного технического университета (филиал в г. Салавате),
Салават, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ»

Энергетическая система большинства индустриально развитых стран с внедрением цифровых технологий трансформируется в интеллектуальную энергосистему. Подготовка специалистов в области интеллектуальных систем управления режимами работы электроэнергетических комплексов диктует необходимость разработки учебных лабораторных установок с элементами искусственного интеллекта. **Целью** проекта является разработка учебно-исследовательского комплекса с элементами искусственного интеллекта для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Интеллектуальные средства управления режимами систем электроснабжения». **Методы:** использован символический метод расчета параметров цепи. При разработке программной части применена гибкая методология (AGILE). При разработке нейросетевого алгоритма использован подход обучения с учителем и алгоритм регрессии. **Результаты:** при выполнении работ произведены замеры параметров исходных данных физических лабораторных стендов «Модель электрической системы с узлом комплексной нагрузки» ООО «ЛабСис», «Автоматизация электроэнергетических систем» ООО «ЛабСис». Создан цифровой двойник лабораторного стенда, дополненный виртуальными объектами электроэнергетических систем с регулируемыми параметрами и средствами управления режимами систем электроснабжения. Выполнено обучение нейронной сети для распознавания режима системы электроснабжения, соответствующего минимальным потерям при передаче электроэнергии. **Практическая значимость:** учебно-исследовательский комплекс содержит учебно-методическое обеспечение для очного, дистанционного и смешанного выполнения лабораторно-практических работ по дисциплине «Интеллектуальные средства управления режимами систем электроснабжения». Цифровой двойник учебно-исследовательского комплекса позволяет получить знания, умения и навыки по проектированию, программированию и эксплуатации интеллектуальных систем управления в электроэнергетике. Нейронная сеть позволяет оптимизировать потери при текущих значениях параметров комплексной нагрузки.

Ключевые слова: электроэнергетика, нейронная сеть, цифровой двойник, активно-адаптивная электрическая сеть, потери электроэнергии, интеллектуальное управление.

**M.G. Bashirov, I.G. Yusupova, O.G. Volkova, M.F. Shvan,
N.N. Daminov, K.K. Kuznetsov, T.R. Sagitov**

Institute of Petroleum Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum
Technical University (branch in Salavat), Salavat, Russian Federation

DEVELOPMENT OF AN EDUCATIONAL AND RESEARCH COMPLEX «INTELLIGENT MEANS OF CONTROL OF MODES OF POWER SUPPLY SYSTEMS»

The energy system of most industrially developed countries is being transformed into an intelligent energy system with the introduction of digital technologies. Training of specialists in the field of intelligent control systems for operating modes of electric power complexes dictates the need to develop educational laboratory installations from domestic manufacturers with elements of artificial intelligence. **The purpose** of the project is to develop an educational and research complex with elements of artificial intelligence for performing laboratory work in the discipline «Intelligent means of controlling the modes of power supply systems». **Methods:** a method for calculating network parameters in complex networks was used. When developing the software part, flexible methodology (AGILE) was used. When developing a neural network algorithm, a supervised learning approach and a regression algorithm were used. **Results:** when carrying out the work, measurements were taken of the parameters of the initial data of physical laboratory stands «Model of an electrical system with a complex load unit» of LabSys LLC, «Automation of electric power systems» of LabSys LLC. A digital twin of the laboratory stand was created, supplemented with virtual objects of electric power systems with adjustable parameters and means of controlling the modes of power supply systems. A neural network was trained to recognize the mode of the power supply system corresponding to minimal losses during the transmission of electricity. **Practical significance:** the educational and research complex includes educational and methodological support for full-time, remote and mixed implementation of laboratory and practical work in the discipline «Intelligent means of controlling the modes of power supply systems». The digital twin of the educational and research complex allows you to gain knowledge, skills and abilities in the design, programming and operation of intelligent control systems in the electric power industry. The neural network allows you to optimize losses at the current values of the parameters of the complex load.

Keywords: electric power industry, neural network, digital twin, active-adaptive electrical network, power losses, intelligent control.

Введение

Особая важность электроэнергии как в жизни рядовых граждан, так и в производственной деятельности крупных предприятий обуславливает необходимость постоянного развития отрасли и соответствия новым подходам и вызовам. Постоянное проведение изысканий неизбежно ведет к возникновению общих точек со смежными областями знаний, что позволяет в ряде случаев достичь синергии. Подобный усиливающий эффект можно наблюдать при применении наиболее перспективных направлений развития электроэнергетического ком-

плекса [1, 2]. Одним из таких направлений является применение искусственного интеллекта, интенсивное развитие которого в совокупности с развитием телекоммуникационных технологий и вычислительных мощностей компьютерной техники позволяет решить ряд проблем электроэнергетики.

Применение нейронных сетей позволяет прогнозировать электропотребление и потери мощности на основе данных о генерации и потреблении электрической энергии, активных элементах, позволяющих изменять топологические параметры сети, определяющие техническое и экономическое состояние энергосистемы, и обеспечивая тем самым необходимый режим. Помимо этого технологии искусственного интеллекта могут быть применены для раннего обнаружения дефектов и предсказания вероятности развития аварийных ситуаций [3, 4].

Развитие отрасли, реализация активно-адаптивных электрических сетей с интеллектуальной системой управления предъявляют все новые требования к компетенциям работников, поэтому становится актуальным вопрос подготовки кадров, обладающих знаниями, умениями и навыками в области цифровизации и интеллектуализации энергетики.

Цель проектно-командной работы заключается в разработке учебно-исследовательского комплекса с элементами искусственного интеллекта для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Интеллектуальные средства управления режимами систем электроснабжения» магистерской программы по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Создание виртуальных имитационных моделей и оснащение их средствами интеллектуального управления способствуют внедрению цифровых технологий и концепции интеллектуальной электроэнергетической системы в учебный процесс. Комплекс включает в себя физическую лабораторную установку и программное обеспечение. Причем последний компонент, в свою очередь, содержит цифровой двойник лабораторной установки и нейросетевой алгоритм.

Практическая значимость проекта заключается в возможности организации очного, смешанного и дистанционного выполнения лабораторных работ по дисциплине «Интеллектуальные средства управления режимами систем электроснабжения» с использованием лабораторных установок с физическими моделями электроэнергетических комплексов и расширения их функциональных возможностей путем

дополнения реальными и виртуальными объектами электроэнергетических систем с регулируемыми параметрами и средствами управления режимами систем электроснабжения.

Для реализации комплекса был произведен анализ существующих на зарубежном и российском рынках предложений по аналогичным лабораторным установкам. Из зарубежных производителей можно отметить испанское предприятие EDIBON International S.A., которое предлагает к реализации учебный лабораторный комплект «Механические, электрические и энергетические системы «Smart Grid». Данный комплект имеет интеллектуальную систему управления, но имеет высокую стоимость и разработан под стандарты, которые отличаются от российских, и требует значительных затрат на адаптацию. Из отечественных производителей учебных лабораторных стендов можно выделить ООО ИПЦ «Учебная техника» (ГК «ГалСен», г. Челябинск) и ООО «ЛабСис», (г. Челябинск), которые реализуют комплекты учебного оборудования с готовыми решениями по активно-адаптивным сетям, но не содержат элементы искусственного интеллекта.

Анализ литературных источников показал наличие достаточно большого количества публикаций зарубежных и отечественных авторов по применению технологий цифровых двойников. Структура цифровых двойников для интеллектуальной системы распределения электроэнергии с применением технологий искусственного интеллекта, состоящая из четырех уровней, описана в работе [5], шестиуровневая архитектура структуры цифрового двойника представлена в работе [6].

Е.В. Ликсина и Е.Г. Бершадская [7] отмечают, что виртуализация процессов позволяет не только значительно уменьшить процент ошибок, но сэкономить время при разработке проектов. А.И. Шинкевич и Р.К. Нургалиев в своей работе провели статистический анализ использования передовых цифровых технологий нефтехимическими предприятиями [8]. П.С. Шпак, Е.Г. Сычева и Е.Е. Меринская исследовали внедрение концепции цифровых двойников зарубежными предприятиями [9]. Литературный обзор позволил выявить также работы по практической реализации учебно-исследовательских комплексов, содержащих цифровые двойники стендов. В Институте нефтехимии и нефтепереработки в г. Салавате уже разработаны цифровой двойник учебного лабораторного стенда на основе эмулятора микропроцессорного контроллера

ОВЕН ПЛК-110-30 с регулятором на основе нечеткой логики [10], учебный лабораторный стенд на основе микропроцессорного контроллера ПЛК «БАЗИС – 100» [11], его цифровой двойник реализован на языке Structured Text стандарта МЭК 61131-3. Физические стенды и их цифровые двойники оснащены программным обеспечением для выполнения лабораторных работ в дистанционном формате. Рабочие панели цифровых двойников обоих лабораторных стендов имитирует панели реальных физических стендов [12]. М.Ю. Перухин, М.Ю. Васильева и Г.К. Кадырова разработали виртуальный лабораторный стенд для измерения расхода и уровня жидких сред [13].

Исследования по применению интеллектуальных систем в электроэнергетических системах больше направлены на идентификацию и прогнозирование технического состояния электрооборудования. В работе [14] показаны примеры применения программных решений на основе нейронных сетей для распознавания и отделения гармоник, поступающих из сети, от гармоник, генерируемых частотно-регулируемым приводом в задачах оценки технического состояния агрегатов с частотно-регулируемым электроприводом. В работе [15] приводятся результаты исследований по созданию интеллектуальной системы оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ, предложен алгоритм расчета коэффициента экспресс-анализа, который реализован в разработанном программном обеспечении. А.И. Федотовым, Г.В. Вагаповым, А.Ф. Абдуллазяновым и А.М. Шаряповым в работе [16] показаны результаты исследований с применением предлагаемой авторами цифровой системы мониторинга повреждений на линиях электропередачи и её практической эксплуатации.

Результаты исследований в области разработки активно-адаптивных электрических сетей с интеллектуальным управлением, распределенной энергетики и микроэнергосистем представлены в работе [17].

Особенности создания цифровых двойников децентрализованных электрических сетей нового поколения рассмотрены в работе [18].

В работах [19, 20], выполненных в Институте нефтехимии и нефтепереработки ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ) в г. Салавате, представлены результаты работ по созданию виртуальной модели активно-адаптивной электрической сети с интеллектуальным управлением на языке программирования Microsoft Visual Studio 2020 C# и цифрового двойника

учебного лабораторного комплекса «Интеллектуальная система энергоснабжения предприятия», позволяющих изучить принцип действия устройств релейной защиты и автоматики, методы расчета уставок и проверок селективности защит.

Обучение нейронной сети с подкреплением для реализации управления параметрами активной распределительной сети энергосистемы показано в работах зарубежных авторов [21–23]. Н. Цзинь, Ф. Ян, Ю. Мо, Ю. Цзэн, С. Чжоу, К. Ян и С. Ма разработали высокоточную модель прогнозирования энергопотребления на основе нейронных сетей [24]. Н.В. Павловым и А.Б. Петровичем в работе [25] показана мультиагентная система управления электрическими режимами электротехнического комплекса. Авторы А.П. Болтунов, А.А. Волошин и Е.А. Волошин в работе [26] описали разработанный программно-аппаратный комплекс, способный выполнять задачи обработки и анализа данных симуляции модели микроэнергосистемы в Real Time Digital Simulator (RTDS). Ш.Ф. Хафизов, А.А. Волошин и Е.А. Волошин разработали модель микроэнергосистемы с помощью библиотеки Simscape Electrical в ПК MatLab, состоящую из дизель-генератора, солнечной и ветряной электростанций, накопителя электроэнергии и управляемой нагрузки для испытания системы автоматического управления нагрузкой [27].

Сегодня весьма актуальны работы по внедрению искусственного интеллекта в разработанные виртуальные системы. На базе Национального исследовательского университета (НИУ) Московского энергетического института (МЭИ) разработан виртуальный инженер для полностью автоматизированного проектирования цифровых подстанций с использованием методов искусственного интеллекта. Загрузив главную электрическую схему подстанции, можно на выходе получить готовые алгоритмы работы системы релейной защиты [28].

Литературный обзор показал, что к моменту начала работы над проектом отсутствуют публикации, затрагивающие учебно-исследовательские комплексы с элементами искусственного интеллекта для выполнения лабораторных и практических работ по дисциплине «Интеллектуальные средства управления режимами систем электроснабжения».

1. Материалы и методы

Разработка учебно-исследовательского комплекса осуществлялась в Институте нефтехимии и нефтепереработки в г. Салавате с использованием физических лабораторных стендов «Модель электрической системы с узлом комплексной нагрузки» ООО «ЛабСис», «Автоматизация электроэнергетических систем» ООО «ЛабСис», дополненных реальными и виртуальными объектами электроэнергетических систем с регулируемыми параметрами и средствами управления режимами систем электроснабжения.

Установленное оборудование представляет собой совокупность модулей, обеспечивающих возможность их комбинирования в произвольном порядке с целью достижения возможности моделирования различных ситуаций и режимов работы в сети. Был произведен анализ имеющихся модулей и их внутренних комплектующих электронных элементов. На основании этого выбраны необходимые элементы схемы. Принято решение использовать модуль трехфазной сети в качестве источника переменного напряжения промышленной частоты. Модуль трехфазных трансформаторов и модули выключателей были выбраны в качестве связующих элементов. В качестве устройства поперечной емкостной компенсации в стендах используется модуль емкостной нагрузки (модуль компенсации). Модуль линии электропередачи в совокупности с модулями нагрузки и компенсации составляют основную часть стенда, изменяемые параметры которых обеспечивают имитацию отклонения режима от оптимального и участвуют в минимизации потерь при выбранном состоянии. На рис. 1 показана структурная схема с выбранными модулями.

Декомпозиция устройства стенда показала, что индуктивная составляющая комплексного сопротивления в модуле линии электропередачи представлена последовательно соединенными дросселями индуктивностью 0,16 Гн. Также установлено, что активная составляющая представляет собой цепь последовательно соединенных резисторов, суммарный номинал которых изменяется переключением галетного переключателя.

Из представленных модулей составлена модель электрической сети, на которой проводятся очные лабораторные работы, суть которых заключается в выборе оптимальных с точки зрения минимизации

потерь, значений параметров модуля емкостной нагрузки (модуля компенсации). Каждый конкретный режим задается изменением величины комплексной нагрузки, а также параметрами модуля линии электропередачи.

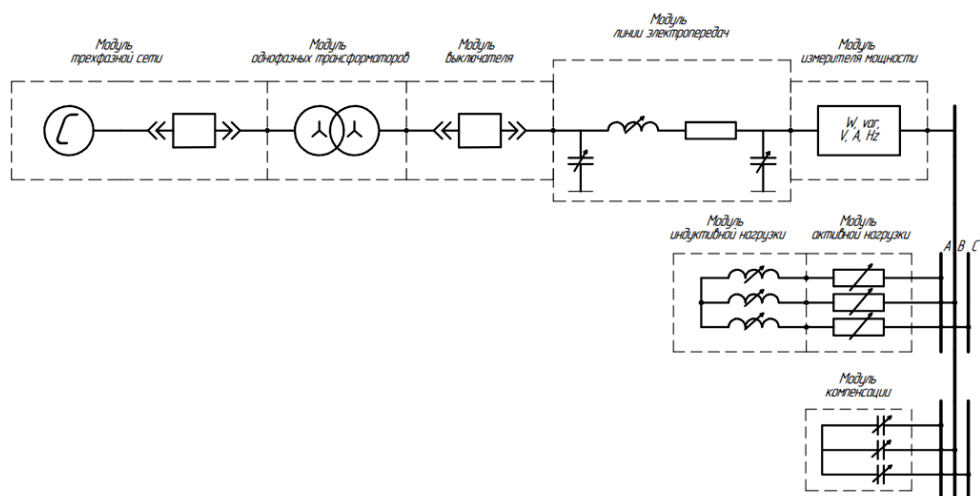


Рис. 1. Структурная схема применяемых модулей

При этом студент изучает зависимость потерь мощности от величины нагрузки и ее характера, влияние поперечной емкостной компенсации на величину напряжений в узлах распределительной сети и способы обеспечения минимальных потерь, допустимые значения которых указаны в ГОСТ Р 50571.5.52–2011. Каждое положение переключателей на модуле линии электропередачи отвечает за моделирование определенных электрических параметров по аналогии с выбором реальных кабелей.

Далее проведены замеры параметров сети при различных положениях переключателей. Исходя из полученных результатов и выявленных значений потерь мощности от величины нагрузки и поперечной емкостной компенсации, принято решение в дальнейшем отступить от реальных значений исходных параметров элементов физического лабораторного стенда ввиду их сравнительно низкой величины, обусловленной требованиями по электробезопасности. Тем самым достигнута большая наглядность и улучшено восприятие при выполнении лабораторной работы студентами.

2. Программная часть комплекса

Следующими этапами разработки учебного комплекса стали проектирование и реализация цифрового двойника стенда. Цифровой двойник стенда позволяет выполнять лабораторную работу «Оптимизация потерь мощности в распределительной сети при различных величинах нагрузки с использованием нейронной сети».

На первом этапе определена структура программной части учебно-исследовательского комплекса. Принято решение разбить программу на три части:

- цифровой двойник стенда;
- алгоритм искусственного интеллекта;
- исполнительная часть программы.

В рамках цифрового двойника реализована виртуальная модель лабораторной работы на основе учебного физического стенда с учетом внесенных изменений параметров реальных элементов для большей наглядности экспериментов. Студенты выполняют лабораторную работу в очном формате в лаборатории, делают измерения с использованием встроенных приборов, выполняют расчеты и на основе их анализа формулируют выводы. На рис. 2 представлена структура программной части комплекса.



Рис. 2. Структура программной части комплекса

Исследования с использованием цифрового двойника физического стенда обучающиеся могут проводить как очно, так и в дистанционном формате. Запустив программу, обучающиеся выбирают тип лабораторной работы и задают первоначальное состояние линии и нагрузки согласно учебно-методическому пособию. При нажатии «рассчитать» программа выполняет расчет и представляет на выходе оптимальные значения параметров модуля емкостной нагрузки (модуля компенсации). Расчеты проводятся несколько раз при различных параметрах

нагрузки и модуля линии электропередачи, и полученные результаты сопоставляются с результатами выполнения лабораторной работы с использованием физического стенда.

Оптимальные значения параметров модуля емкостной нагрузки (модуля компенсации), соответствующие минимальным потерям, определяются искусственной нейронной сетью по результатам работы первой части программы, предназначенной для представления графического интерфейса пользователя и осуществления физических расчетов, которые автоматически передаются на его вход. На выходе нейронной сети представляется вероятность оптимального положения переключателей на модуле емкостной нагрузки (модуле компенсации).

Выставление оптимального положения переключателя будет осуществляться посредством исполнительной части программы, которая на основании вычисленной вероятности будет изменять входные параметры цифрового двойника стенда.

Для реализации описанной выше структуры был выбран язык программирования Python версии 3.9. Язык программирования был выбран, исходя из доступности и наличия обширной стандартной библиотеки. Удобной интегрированной средой разработки для выбранного языка является продукт PyCharm от компании JetBrains. Выбор обусловлен поддержкой автодополнения кода и подсказками по формату написания в соответствии с принятым для языка стандартом, а также удобством интеграции с Git – распределенной системой управления версиями, благодаря которой над проектом могли одновременно работать сразу несколько разработчиков.

Цифровой двойник на первом этапе решено реализовывать в виде оконного приложения. Применение библиотеки PyQt5, представляющей собой набор графического фреймворка Qt для языка Python, и приложения QtDesigner, имеющего удобный графический интерфейс и подход drag-and-drop (бери-и-брось), способствовало ускорению процесса разработки дизайна приложения.

На рис. 3 представлен внешний вид цифрового двойника стенда.

Для математических вычислений использована библиотека numpy. Ее преимуществами являются открытый исходный код и поддержка операций с массивами и матрицами, а также обширный набор встроенных функций для работы с ними.

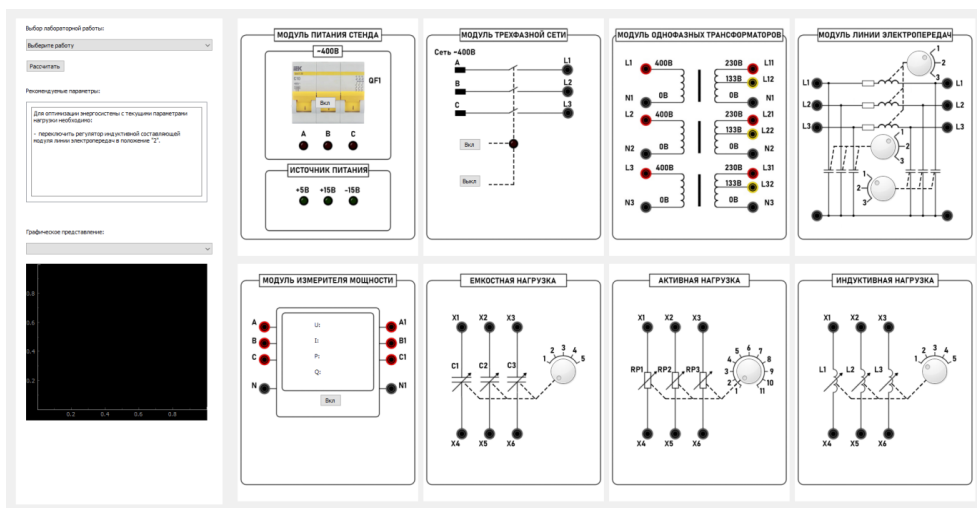


Рис. 3. Фрагмент имитационной модели модулей с диалоговыми окнами

Процесс разработки состоит из этапов шаблонного проектирования визуального интерфейса, создания приложения на условных функциях, не реализующих требуемый функционал, но представляющих общую структуру и взаимосвязь между элементами программы. Далее на разработанный прототип прописана внутренняя логика обработки событий и добавлены функции, позволяющие осуществлять основные расчеты. Завершающим этапом были отладка и оптимизация кода программы, а также обеспечение удобства интеграции с нейросетевым алгоритмом.

3. Разработка и обучение нейронной сети

Для обеспечения оптимального режима сети при текущей нагрузке и параметров линии необходимо определить соответствующие положения переключателей на модуле емкостной нагрузки (модуле компенсации). Нейронная сеть обучается по принципу обучения с учителем, а именно применением метода логистической регрессии. Данный тип задач подразумевает выявление влияния входных независимых переменных на некоторую выходную.

Для обучения подготовлена база исходных данных, часть из которой была отделена для тестовой выборки. Набор данных представляет собой вектор, содержащий результат расчета параметров цифрового двойника, а именно величину потерь в линии. Исходные данные промаркированы согласно положению переключателей модуля емкостной

нагрузки (модуля компенсации) для каждого конкретного режима. Таким образом, посредством запуска цифрового двойника в циклическом режиме для всех возможных значений сформирована минимально необходимая база данных для решения поставленной задачи.

Проанализированы и применены разные виды алгоритмов обучения нейронной сети, и выбор сделан в пользу логистической регрессии – наиболее простой и предоставляющей удовлетворительный уровень точности.

Модель позволяет определить вероятность того, что при определенных значениях нагрузки (активной и индуктивной составляющих) и параметров модуля линии электропередачи оптимальным будет выставить одно из пяти положений переключателей емкостной составляющей на модуле компенсации (принадлежность к одному из пяти классов « i »). Независимая переменная « x », являющаяся входным параметром модели, представляет собой вектор значений « $x1$ » – одно из пяти положений переключателя индуктивной нагрузки, « $x2$ » – одно из одиннадцати положений переключателей активной нагрузки, « $x3$ » – одно из трех положений переключателя модуля линии электропередачи, « $x4$ » – одно из пяти исходных положений емкостной нагрузки.

Вычислить принадлежность входного значения « x » к классу « i » представляется возможным с помощью функции мягкого максимума, называемой также *softmax* и записываемой в виде [29, с.63]:

$$P(y = i | x) = \text{softmax}_i(Wx + b) = \frac{e^{W_i x + b_i}}{\sum_{j=1}^n e^{W_j x + b_j}},$$

где W – матрица, представляющая веса соединений входного и выходного слоев; b – вектор, соответствующий смещению; j – порядковый номер класса, принимает значение от 1 до n , где n – общее число классов, $n = 5$; x – входное значение из независимых переменных; y – выходное значение.

Таким образом, зависимая переменная « y » принимает значение, соответствующее классу « i ». Результатом работы алгоритма мягкого максимума является вектор с вероятностями в данном случае пяти возможных ситуаций. Исходя из указанной выше формулы, задача сводится к определению значений элементов матриц W и b . Решение

будет получено с помощью модели логистической регрессии, построение которой было выполнено в четыре этапа.

На первом этапе создается распределение вероятностей по выходным классам. На втором этапе вычисляется значение функции потерь посредством перекрестной энтропии. На третьем этапе вычисляются градиент параметров модели и ее обновление. На завершающем этапе вычисляется эффективность модели.

В качестве библиотеки для машинного обучения принято решение использовать открытую программную библиотеку TensorFlow от компании Google. Такой выбор обуславливается наличием обширной документации и готовых руководств, а также встроенных средств, позволяющих упростить процесс обучения. К таким средствам можно отнести удобную визуализацию и возможность мониторинга процесса обучения. Другим преимуществом является активная поддержка со стороны сообщества, а следовательно, большое количество учебно-методических и научных материалов, которые можно адаптировать под нужды текущей задачи.

Из недостатков можно выделить сравнительно низкую скорость работы, например, по сравнению с фреймворком MXNet от Apache. Однако лучшая производительность последнего сочетается с большей сложностью освоения данного функционала ввиду нацеленности его на промышленные проекты. Как следствие, относительная новизна конкурента и его ориентированность на масштабные задачи не способствовали популяризации в научном сообществе, что повысило порог вхождения и усложнило имплементацию данного инструмента к рассматриваемой задаче.

В свою очередь, продукты, предлагающие ещё более удобные решения для начального этапа реализации проекта, такие как PyTorch от FaceBook и Keras от Google, либо не предоставляют средства визуализации и мониторинга, предлагают недостаточную поддержку моделей, что может ограничить масштабирование учебного комплекса в дальнейшем, либо ограничены по набору функционала и обладают низкой гибкостью настройки, что делает невозможным создание узкоспециализированной модели для обучения.

Таким образом, выбор TensorFlow был оптимальным для решения поставленной задачи. Данную библиотеку активно используют как в научной среде, так и в крупных компаниях, таких как DeepMind (Great Britain, London), Uber (USA, California) и AirBnb (USA, San Francisco).

На заключительной стадии нейронный сетевой алгоритм был встроен в единое программное решение, обеспечивающее удобный интерфейс для пользователя. Через оконное приложение, выполненное с помощью библиотеки PyQt5, в проект имплементированы все три структурных компонента программной части комплекса. Таким образом, визуальное представление выступает в качестве связующего элемента между этими структурными компонентами: нейронной сетью (блок искусственной интеллекта), расчетной (блок цифрового двойника стенда) и исполнительными частями программы.

В левой части пользователь конфигурирует начальные параметры, управляет процессом расчета и получает результаты, выводимые в окно «Рекомендуемые параметры». Также в этой части приложения можно получить графическое представление данных, полученных в процессе расчета. Таким образом, обучающийся может просмотреть векторные диаграммы, позволяющие ему лучше понять происходящий процесс и убедиться в правильности своих выводов.

Рабочее поле по функциональному назначению разделено на две части (рис. 4).

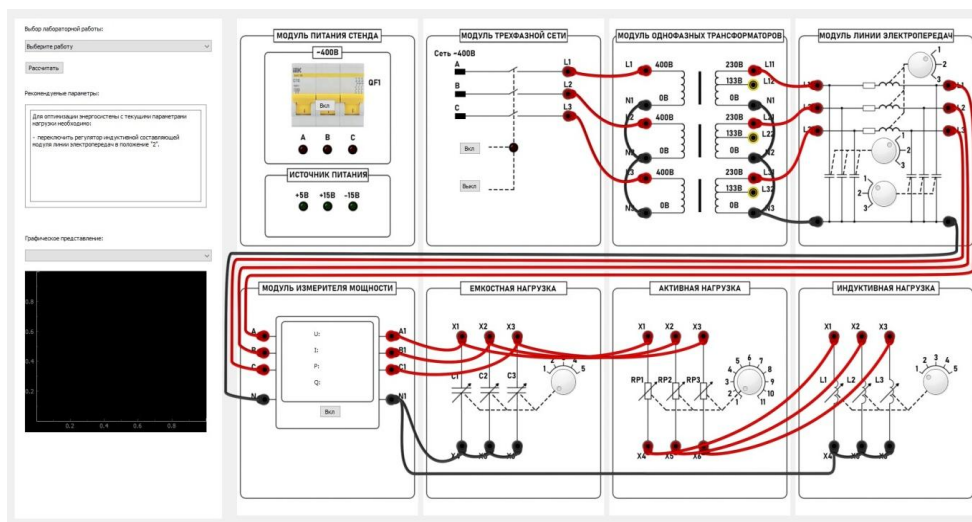


Рис. 4. Сборка схемы и подключение элементов в цифровом двойнике стенда

На рис. 4 показано окно цифрового двойника стенда с указанием последовательности действий: выбор лабораторной работы, сборка схемы, подключение элементов, включение питания и загорание инди-

каторов. Правая часть дублирует физический стенд как по графическому представлению, так и по функциональному наполнению. В связи с этим после выбора типа выполняемой лабораторной работы студенту необходимо полностью повторить манипуляции, осуществляемые при обращении с физическим стендом в лаборатории. Единственным отличием является подключение проводов, осуществляемое в процессе соединения схемы согласно методическому пособию. Данный этап в цифровом двойнике стенда автоматизирован с целью обеспечения необходимого уровня абстракции, благодаря которому студент сможет абстрагироваться от механических действий и сконцентрироваться на анализе своих решений, на том, как совершаемые им изменения в параметрах цепи влияют на процесс в целом.

Заключение

Разработана структура учебно-исследовательского комплекса и составлены методические пособия, описывающие его функционирование при выполнении лабораторных работ в очном, дистанционном и смешанном форматах.

Создан цифровой двойник лабораторного стенда. Для распознавания одного из возможных режимов функционирования системы электроснабжения, а также оптимизации параметров активно-адаптивной электрической сети разработан и обучен нейронный сетевой алгоритм. Также использование нейронной сети позволит использовать плавное изменение параметров на цифровом двойнике стенда.

Спроектированный комплекс содержит учебно-методическое обеспечение для очного, дистанционного и смешанного выполнения лабораторно-практических работ по дисциплине «Интеллектуальные средства управления режимами систем электроснабжения». Пособия разработаны с учетом современных тенденций и с применением перспективных технологий в образовательном процессе.

Результатом использования учебно-исследовательского комплекса является повышение качества подготовки магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника», адаптация их к трудовой деятельности в условиях активно-адаптивных электрических сетей с интеллектуальными системами управления, защиты и диагностики.

Библиографический список

1. Моршин А.В. Глубинное машинное обучение // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2019. – № 3. – С. 270–273.
2. Shen Z, Arraño-Vargas F., Konstantinou G. Artificial intelligence and digital twins in power systems: Trends, synergies and opportunities // Digital Twin. – 2022. – P. 2–14. DOI: 10.12688/digitaltwin.17632.1
3. Кощев М.И., Ларюхин А.А., Славутский А.Л. Использование адаптивных нейроалгоритмов для распознавания аномальных режимов систем вторичного оборудования электроэнергетики // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 47–58.
4. Елтышев Д.К. Интеллектуальные технологии в организации процесса эксплуатации электротехнического оборудования // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 43. – С. 119–135. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.07
5. An architecture based on digital twins for smart power distribution system / G. Zhang, C. Huo, L. Zheng, X. Li // Proceedings of the 2020 3rd International conference on artificial intelligence and big data (ICAIBD). – 2020. – P. 29–33. DOI: 10.1109/ICAIBD49809.2020.9137461
6. Andryushkevich S.K., Kovalyov S.P., Nefedov E. Composition and application of power system digital twins based on ontological modeling // IEEE 17th International conference on industrial informatics (INDIN), Helsinki, Finland. – 2019. – P. 1536–1542. DOI: 10.1109/INDIN41052.2019.8972267
7. Ликсина Е.В., Бершадская Е.Г. Автоматизация процесса разработки виртуальных лабораторий [Электронный ресурс] // Студенческий научный форум: материалы XI Междунар. студ. науч. конф. – 2019. – № 3. – С. 28–30. – URL: <https://scienceforum.ru/2019/article/2018017317> (дата обращения: 20.10.2023).
8. Шинкевич А.И., Нургалиев Р.К. Особенности управления нефтехимическим производством в индустрии 4.0 // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 3. – С. 119–124.
9. Шпак П.С., Сычева Е.Г., Меринская Е.Е. Концепция цифровых двойников как современная тенденция цифровой экономики // Вестник Омского университета. Сер. Экономика. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 57–68.

10. Кислицын Н.А., Акчурин Д.Ш., Баширов М.Г. Лабораторный комплекс на основе микропроцессорных средств компании «Овен» // Южно-Сибирский научный вестник. – 2021. – № 2 (36). – С. 109–114.

11. Учебный имитационно-моделирующий комплекс на основе ПЛК БАЗИС-100 / М.Г. Баширов, Д.Ш. Акчурин, И.И. Костиков, К.Г. Николаев // Автоматизация в промышленности. – 2021. – № 9. – С. 30–35.

12. Баширов М.Г., Хафизов А.М., Адельгужин Р.Р. Цифровой двойник лабораторного комплекса с регулятором на основе нечеткой логики // Южно-Сибирский научный вестник. – 2023. – № 3 (49). – С. 108–113.

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

14. Хисамов Н.А., Журба Я.С., Баширов М.Г. Применение нейросетей в диагностике агрегатов с частотно-регулируемым приводом // Молодые исследователи – регионам: материалы междунар. науч. конф.; 17 апреля 2023 г., Вологда. – Вологда: Изд-во ВоГУ. – 2023. – С. 82–85.

15. Интеллектуальная система оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ / И.В. Ившин, А.Р. Галяутдинова, О.В. Владимиров [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 24–34. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-2-24-35

16. Цифровая система мониторинга повреждений на линиях электропередачи / А.И. Федотов, Г.В. Вагапов, А.Ф. Абдуллазянов, А.М. Шаряпов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 146–155. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155

17. Intelligent Tutoring and Training Tools for the Electric Power Sector Developed at ИЕ / A. Reyes, Ya. Hernández, P. Buen [et al.] // Research in Computing Science. – 2012. – № 47. – P. 81–93. DOI: 10.13053/rcs-47-1-8

18. A Digital twin for cyber-physical energy systems / P. Pileggi, J. Verriet, J. Broekhuijsen [et al.] // 7th Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES), Montreal, QC, Canada. – 2019. – P. 1–6. DOI: 10.1109/MSCPES.2019.8738792

19. Разработка цифрового двойника учебного лабораторного комплекса / М.Г. Баширов, М.Ф. Шван, Э.И. Ахметшина, А.Ф. Хакимов // *Components of Scientific and Technological Progress*. – № 6. – 2023. – С. 138–141.

20. Баширов М.Г., Акчурин Д.Ш., Коновалов Э.А. Разработка цифровых двойников объектов электроэнергетики и виртуального учебно-исследовательского комплекса для подготовки специалистов в области электроснабжения // *Федоровские чтения – 2021: материалы LI Междунар. науч.-практ. конф.*; 17–19 ноября 2021 г. Москва. – М.: Изд. дом МЭИ. – 2021. – С. 65–72.

21. Reinforcement learning for selective key applications in power systems: Recent advances and future challenges / X. Chen, G. Qu, Y. Tang [et al.] // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2022. DOI: 10.1109/TSG.2022.3154718

22. Sun X., Qiu J. Two-stage volt/var control in active distribution networks with multi-agent deep reinforcement learning method // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2021. – Vol. 12, № 4. – P. 2903–2912. DOI: 10.1109/TSG.2021.3052998

23. Deep reinforcement learning enabled physical-model-free two-timescale voltage control method for active distribution systems / D. Cao, J. Zhao, W. Hu [et al.] // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2021. – Vol. 13, № 1. – P. 149–165. DOI: 10.1109/TSG.2021.3113085

24. Highly accurate energy consumption forecasting model based on parallel LSTM neural networks / N. Jin, F. Yang, Y. Mo [et al.] // *Adv. Eng. Informatics*. – 2022. – № 51. – 101442 p. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101442

25. Павлов Н.В. Разработка мультиагентной системы управления электрическими режимами электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с распределенной генерацией // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2022. – № 42. – С. 151–177. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.08

26. Болтунов А.П., Волошин А.А., Волошин Е.А. Разработка интеллектуальной системы прогнозирования нагрузки потребителей в микрогрид-системах // *Электротехника глазами молодежи: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф.*; 15–17 сентября 2020, Ставрополь. – Ставрополь: Изд-во Северо-Кавказ. федерал. ун-та, 2020. – С. 74–78.

27. Хафизов Ш.Ф., Волошин А.А., Волошин Е.А. Разработка распределенной интеллектуальной системы управления нагрузкой в микроэнергосистемах // *Электроэнергетика глазами молодежи: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф.*; 15–17 сентября 2020, Ставрополь. – Ставрополь: Изд-во Северо-Кавказ. федерал. ун-та, 2020. – Т. 2. – С. 203–206.

28. Курбатов А. Виртуальный инженер поможет проектировать энергообъекты. – URL: <https://inscience.news/ru/article/nti/9377> (дата обращения: 12.10.2023).

29. Будума Н., Локашо Н. Основы глубокого обучения. Создание алгоритмов для искусственного интеллекта следующего поколения / пер. с англ. А. Коробейникова; науч. ред. А. Созыкин. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2020. – 304 с.

References

1. Morshin A.V. Glubinnoe mashinnoe obuchenie [Deep machine training]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2019, no. 3, pp. 270-273.

2. Shen Z, Arraño-Vargas F., Konstantinou G. Artificial intelligence and digital twins in power systems: Trends, synergies and opportunities. *Digital Twin*, 2022, pp. 2-14. DOI: 10.12688/digitaltwin.17632.1

3. Koshcheev M.I., Lariukhin A.A., Slavutskii A.L. Ispol'zovanie adaptivnykh neiroalgoritmov dlia raspoznavaniia anomal'nykh rezhimov sistem vtorichnogo oborudovaniia elektroenergetiki [The use of adaptive neural algorithms for recognizing anomalous modes of secondary equipment systems in the electric power industry]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2019, no. 1, pp. 47-58.

4. Eltyshev D.K. Intellektual'nye tekhnologii v organizatsii protsessa ekspluatatsii elektrotekhnicheskogo oborudovaniia [Intelligent technologies in the electrical equipment operation process organizatios]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2022, no. 43, pp. 119-135. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.07

5. Zhang G., Huo C., Zheng L., Li X. An architecture based on digital twins for smart power distribution system. *Proceedings of the 2020 3rd International conference on artificial intelligence and big data (ICAIBD)*, 2020, pp. 29-33. DOI: 10.1109/ICAIBD49809.2020.9137461

6. Andryushkevich S.K., Kovalyov S.P., Nefedov E. Composition and application of power system digital twins based on ontological modeling. *IEEE 17th International conference on industrial informatics (INDIN), Helsinki, Finland*, 2019, pp. 1536-1542. DOI: 10.1109/INDIN41052.2019.8972267

7. Liksina E.V., Bershadskaya E.G. Avtomatizatsiya protsessa razrabotki virtual'nykh laboratorii [Automation of the process of developing virtual laboratories]. *Studencheskii nauchnyi forum. Materialy XI Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchnoi konferentsii*, 2019, no. 3, pp. 28-30, available at: <https://scienceforum.ru/2019/article/2018017317> (accessed 20 October 2023).

8. Shinkevich A.I., Nurgaliev R.K. Osobennosti upravleniia neftekhimicheskim proizvodstvom v industrii 4.0 [Features of the management of petrochemical production in industry 4.0]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2021, no. 3, pp. 119-124.

9. Shpak P.S., Sycheva E.G., Merinskaia E.E. Kontseptsiiia tsifrovyykh dvoynikov kak sovremennaya tendentsiia tsifrovoi ekonomiki [The concept of digital twins as a modern trend in the digital economy]. *Vestnik Omskogo universiteta. Ekonomika*, 2020, Vol. 18, no. 1, pp. 57-68.

10. Kislitsyn N.A., Akchurin D.Sh., Bashirov M.G. Laboratornyi kompleks na osnove mikroprotsessornykh sredstv kompanii "Oven" [Laboratory complex based on microprocessor facilities of "Owen" company]. *Iuzhno-Sibirskii nauchnyi vestnik*, 2021, no. 2 (36), pp. 109-114.

11. Bashirov M.G., Akchurin D.Sh., Kostikov I.I., Nikolaev K.G. Uchebnyi imitatsionno-modeliruiushchii kompleks na osnove PLK BAZIS-100 [Educational simulation and modeling complex based on PLC BAZIS-100]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2021, no. 9, pp. 30-35.

12. Bashirov M.G., Khafizov A.M., Adel'guzhin R.R. Tsifrovoy dvoynik laboratornogo kompleksa s regulatorom na osnove nechetkoi logiki [Digital twin of a laboratory complex with a controller based on fuzzy logic]. *Iuzhno-Sibirskii nauchnyi vestnik*, 2023, no. 3 (49), pp. 108-113.

13. Petrukhin M.Iu., Vasil'eva M.Iu., Kadyrova G.K. Tsifrovoy dvoynik laboratorii sistem upravleniia khimiko-tekhnologicheskimi protsessami [Digital twin of the laboratory of control systems for chemical technological processes]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2021, no. 6-1, pp. 84-90.

14. Khisamov N.A., Zhurba Ia.S., Bashirov M.G. Primenenie neurosetei v diagnostike agregatov s chastotno-reguliruemym privodom

[Application of neural networks in the diagnostics of units with variable frequency drive]. *Molodye issledovateli - regionam. Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, 17 April 2023, Vologda*. Vologda: Vologodskii gosudarstvennyi universitet, 2023, pp. 82-85.

15. Ivshin I.V., Galiautdinova A.R., Vladimirov O.V. et al. Intellectua'naiia sistema otsenki tekhnicheskogo sostoianiia transformatornoi podstantsii 35/6(10) kV [The intelligent system for assessing the technical condition a transformer substation of 35/6(10) kV]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 24-34. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-2-24-35

16. Fedotov A.I., Vagapov G.V., Abdullazianov A.F., Shariapov A.M. Tsifrovaia sistema monitoringa povrezhdenii na liniiax elektroperedachi [Digital power lines faults monitoring system]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 146-155. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155

17. Reyes A., Hernández Ya., Buen P. et al. Intelligent Tutoring and Training Tools for the Electric Power Sector Developed at IIE. *Research in Computing Science*, 2012, no. 47, pp. 81-93. DOI: 10.13053/rcs-47-1-8

18. Pileggi P., Verriet J., Broekhuijsen J. et al. A Digital twin for cyber-physical energy systems. *7th Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES), Montreal, QC, Canada*, 2019, pp. 1-6. DOI: 10.1109/MSCPES.2019.8738792

19. Bashirov M.G., Shvan M.F., Akhmetshina E.I., Khakimov A.F. Razrabotka tsifrovogo dvoynika uchebnogo laboratornogo kompleksa [Development of a digital twin of the training laboratory complex]. *Components of Scientific and Technological Progress*, no. 6, 2023, pp. 138-141.

20. Bashirov M.G., Akchurin D.Sh., Konovalov E.A. Razrabotka tsifrovyykh dvoynikov ob"ektov elektroenergetiki i virtual'nogo uchebno-issledovatel'skogo kompleksa dlia podgotovki spetsialistov v oblasti elektrosnabzheniia [Development of digital counterparts of electric power facilities and a virtual educational and research complex for training specialists in the field of power supply]. *Fedorovskie chteniia - 2021. Materialy LI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 17-19 November 2021 Moscow*. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 2021, pp. 65-72.

21. Chen X., Qu G., Tang Y. et al. Reinforcement learning for selective key applications in power systems: Recent advances and future challenges. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022. DOI: 10.1109/TSG.2022.3154718

22. Sun X., Qiu J. Two-stage volt/var control in active distribution networks with multi-agent deep reinforcement learning method. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, vol. 12, no. 4, pp. 2903-2912. DOI: 10.1109/TSG.2021.3052998

23. Cao D., Zhao J., Hu W. et al. Deep reinforcement learning enabled physical-model-free two-timescale voltage control method for active distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, vol. 13, no. 1, pp. 149-165. DOI: 10.1109/TSG.2021.3113085

24. Jin N., Yang F., Mo Y. et al. Highly accurate energy consumption forecasting model based on parallel LSTM neural networks. *Adv. Eng. Informatics*, 2022, no. 51, 101442 p. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101442

25. Pavlov N.V. Razrabotka mul'tiagentnoi sistemy upravleniia elektricheskimi rezhimami elektrotekhnicheskogo kompleksa neftegazodobyvaiushchego predpriiatiia s raspredelennoi generatsiei [Development of multiagent control system for electric modes of the electrotechnical complex at oil and gas producing enterprise with microgrid]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2022, no. 42, pp. 151-177. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.08

26. Boltunov A.P., Voloshin A.A., Voloshin E.A. Razrabotka intellektual'noi sistemy prognozirovaniia nagruzki potrebitelei v mikrogrid-sistemakh [Development of an intelligent system for microgrid consumers power load forecasting]. *Elektroenergetika glazami molodezhi. Materialy XI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, 15-17 September 2020, Stavropol'*. Stavropol': Severo-Kavkazskii federal'nyi universitet, 2020, pp. 74-78.

27. Khafizov Sh.F., Voloshin A.A., Voloshin E.A. Razrabotka raspredelennoi intellektual'noi sistemy upravleniia nagruzkoj v mikroenergосistemakh [Development of a distributed intelligent system for load management in micro energy systems]. *Elektroenergetika glazami molodezhi. Materialy XI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, 15-17 September 2020, Stavropol'*. Stavropol': Severo-Kavkazskii federal'nyi universitet, 2020, vol. 2, pp. 203-206.

28. Kurbatov A. Virtual'nyi inzhener pomozhet proektirovat' energoob'ekty [A virtual engineer will help design energy facilities], available at: <https://inscience.news/ru/article/nti/9377> (accessed: 12 October 2023).

29. Buduma N., Lokasho N. Osnovy glubokogo obucheniia. Sozdanie algoritmov dlia iskusstvennogo intellekta sleduiushchego pokoleniia [Fundamentals of deep learning. Designing Next-Generation Machine Intelligence Algorithms]. Ed. A. Sozykin. Moscow: Mann, Ivanov i Ferber, 2020, 304 p.

Сведения об авторах

Баширов Мусса Гумерович (Салават, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Салавате) (453250, Салават, ул. Губкина, 22Б, e-mail: eapp@yandex.ru).

Юсупова Ильвина Гамировна (Салават, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Салавате) (453250, Салават, ул. Губкина, 22Б, e-mail: ilvina011@mail.ru).

Волкова Ольга Геннадиевна (Салават, Российская Федерация) – ассистентка кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Салавате) (453250, Салават, ул. Губкина, 22Б, e-mail: olya2700@list.ru).

Шван Мария Фридриховна (Салават, Российская Федерация) – ассистентка кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета (453250, Салават, ул. Губкина, 22Б, e-mail: shvan.2011@yandex.ru).

Даминов Наргиз Нурович (Салават, Российская Федерация) – магистрант кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Салавате) (453250, Салават, ул. Губкина, 22Б, e-mail: nagix230@gmail.com).

Кузнецов Кирилл Викторович (Салават, Российская Федерация) – магистрант кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии

Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Салавате) (453250, Салават, ул. Губкина, 22Б, e-mail: kuzrik123@mail.ru).

Сагитов Тимур Русланович (Салават, Российская Федерация) – магистрант кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» Института нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Салавате) (453250, Салават, ул. Губкина, 22Б, e-mail: temur199989@mail.ru).

About the authors

Mussa G. Bashirov (Salavat, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Institute of Petroleum Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technical University (branch in Salavat) (453250, Salavat, 22B, Gubkin str., e-mail: eapp@yandex.ru).

Il'vina G. Yusupova (Salavat, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Institute of Petroleum Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technical University (branch in Salavat) (453250, Salavat, 22B, Gubkin str., e-mail: ilvina011@mail.ru).

Ol'ga G. Volkova (Salavat, Russian Federation) – Assistant Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Institute of Petroleum Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technical University (branch in Salavat) (453250, Salavat, 22B, Gubkin str., e-mail: olya2700@list.ru).

Mariya F. Shvan (Salavat, Russian Federation) – Assistant Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Institute of Petroleum Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technical University (branch in Salavat) (453250, Salavat, 22B, Gubkin str., e-mail: shvan.2011@yandex.ru).

Nargiz N. Daminov (Salavat, Russian Federation) – Master Degree Student Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Institute of Petroleum Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technical University (branch in Salavat) (453250, Salavat, 22B, Gubkin str., e-mail: nagix230@gmail.com).

Kirill V. Kuznetsov (Salavat, Russian Federation) – Master Degree Student Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Institute of Petroleum Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technical University (branch in Salavat) (453250, Salavat, 22B, Gubkin str., e-mail: kuzrik123@mail.ru).

Timur R. Sagitov (Salavat, Russian Federation) – Master Degree Student, Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Institute of Petroleum Refining and Petrochemistry of Ufa State Petroleum Technical University (branch in Salavat) (453250, Salavat, 22B, Gubkin str., e-mail: timur199989@mail.ru).

Поступила: 09.11.2023. Одобрена: 01.12.2023. Принята к публикации: 10.12.2023.

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Разработка учебно-исследовательского комплекса «интеллектуальные средства управления режимами систем электроснабжения» / М.Г. Баширов, И.Г. Юсупова, О.Г. Волкова, М.Ф. Шван, Н.Н. Даминов, К.В. Кузнецов, Т.Р. Сагитов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2023. – № 48. – С. 5–29. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.4.01

Please cite this article in English as:

Bashirov M.G., Yusupova I.G., Volkova O.G., Shvan M.F., Daminov N.N., Kuznetsov K.K., Sagitov T.R. Development of an educational and research complex «intelligent means of control of modes of power supply systems». *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2023, no. 48, pp. 5-29. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.4.01