

Разработка нейросетевого метода и программного инструмента оценки потерь электроэнергии

В.Н. Пичугин ¹✉, А.А. Солдатов ¹, Е.Р. Тюрюшова ¹

¹ Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, 428015, Россия

Ссылка для цитирования

Пичугин В.Н., Солдатов А.А., Тюрюшова Е.Р. Разработка нейросетевого метода и программного инструмента оценки потерь электроэнергии // Программные продукты и системы. 2024. Т. 37. № 2. С. 289–294. doi: 10.15827/0236-235X.142.289-294

Информация о статье

Группа специальностей ВАК: 1.2.2

Поступила в редакцию: 15.11.2023

После доработки: 11.01.2024

Принята к публикации: 05.02.2024

Аннотация. Предприятия электроэнергетики сталкиваются с большими экономическими потерями из-за недоучета электроэнергии. Предметом рассмотрения в статье является процесс сбора удаленных данных учета электроэнергии, например, цифровых подстанций предприятий и сетевых компаний, занимающихся ее передачей. Цель исследования – реализация программного инструмента обработки и предсказания данных, полученных с помощью радиоприемного цифрового модуля для обнаружения, идентификации и удаленной передачи данных на базе фрактальных антенн. Программный инструмент разработан в интегрированной среде Visual Studio 2019 с использованием оригинальных библиотек на платформе Windows. Все свойства объектов доступны для изменения, интерфейсная форма и визуальные компоненты создаются в процессе как проектирования, так и компиляции. Для программной оценки недоучета электрической энергии по показаниям использованы статистический метод и метод искусственной нейронной сети многослойного перцептрона. Подобные методы исследования больших данных, основанные на анализе показаний счетчиков электроэнергии, которые формируются в результате ежемесячного сбора, позволяют судить о их несоответствиях нормам, характеристике и типе недоучета, размерах потерь и т.д. Основным результатом является новый нейросетевой метод выявления данных о потерях электроэнергии, позволяющий обнаруживать неправильные коммерческие данные показаний электросчетчиков. Разработанный программный инструмент применяется для цифрового модуля передачи показаний приборов энергопотребления и использует умные алгоритмы метода для учета несоответствий данных о передаваемой электроэнергии на цифровых подстанциях.

Ключевые слова: нейросетевой метод, цифровые подстанции сетевой компании, программная оценка, статистический метод, недостоверный учет электроэнергии

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям, федеральный проект «Платформа университетского технологического предпринимательства», договор № 303ГССС15-L/78984

Введение. В России активно автоматизируется сбор информации с приборов учета расхода тепла, газа, воды, электричества и т.п. Основной целью учета электроэнергии является получение достоверной информации о количестве производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии на оптовом рынке ЕЭС России и розничном.

Ведутся разработки технологий, позволяющих передавать данные расхода ресурсов по различным проводным и эфирным каналам связи. Созданы приборы и устройства, передающие по существующим проводным сетям показания приборов учета расхода электричества. Основанием для исследований являются экономия времени и усилий по получению необходимой информации для учета показаний электроэнергии с подстанций и повышение скорости принятия решений [1].

Объект исследования – российские предприятия, отвечающие за производство, передачу и сбыт электроэнергии.

В технической литературе описаны способы построения автоматизированных информационно-измерительных систем контроля за функционированием узла энергопотребления. Так, в работе [2] представлен алгоритм анализа достоверности учета электроэнергии балансовым методом, который является основным и стандартным у всех сетевых компаний. Однако достоверность работы единичного рабочего места информационно-измерительной системы этим методом проверить нельзя. Один из авторов данной статьи (Солдатов А.А.) предложил оценивать достоверность измерений посредством сопоставления показаний дублирующих друг друга измерительных узлов учета и улучшил методику определения погрешности работы информационной системы [3]. В рабо-

те [4] предлагается использовать аналитические методы анализа, а именно решения статистического контроля режимов электропотребления, основанного на критерии достоверности учета электроэнергии. Метод предполагает анализ случайной величины, характеризующей режим работы узла учета электроэнергии, зависящей от величины тока на присоединении и равной максимальной по абсолютной величине разности значений углов фазового сдвига между током и напряжением (метод 3σ) [5].

Известно, что важным фактором качественного решения задачи определения достоверности учета электроэнергии является точность расчетной модели, отражающей текущее состояние режима работы узла энергопотребления [6, 7]. В оригинальных статьях [8, 9] представлены возможности использования *искусственной нейронной сети* (ИНС) в качестве основы для метода контроля функционирования информационно-измерительной системы функционирования узла энергопотребления [10].

Авторами настоящей работы спроектирован программный инструмент, позволяющий моделировать картину обработки и предсказания данных электроэнергии, алгоритмы его использования и, таким образом, учитывать несоответствия в показаниях приборов учета электрической энергии.

Метод исследования

Построение строгой функциональной зависимости величин, определяющих значение мощности, вычисляемой приборами учета электроэнергии, является сложной задачей. В связи с этим для решения задачи верификации режимов работы узлов учета комплекса многопараметрического учета распределенного энергопотребления предложено рассмотреть альтернативный метод контроля, основанный на ИНС многослойного персептрона, способной осуществлять поиск решения в многомерном пространстве многопараметрических параметров.

Программный инструмент и результаты его работы

На первом этапе выбирается архитектура ИНС многослойного персептрона. Обычно моделирование оптимальной структуры сети сопровождается возникновением вопросов, связанных с определением числа нейронов m в сети и количества скрытых слоев n , с использованием функции активации нейрона f , а также

алгоритма обучения сети. В данном случае число входов ИНС определяется девятью признаками, представимыми действительными числами. Задача нейронной сети состоит в определении на выходе из нее необходимого класса состояния режима работы узла учета комплекса многопараметрического учета распределенного энергопотребления в виде одного из трех возможных номинальных вариантов, определяемых вектором выходных данных: $P_{out} = [P_{out1}, P_{out2}, P_{out3}]^T$, где P_{out1} – режим работы «НОРМА», P_{out2} – режим работы «НЕИСПРАВНОСТЬ», P_{out3} – режим работы «НЕ ОПРЕДЕЛЕНО».

Выбор структуры ИНС будет опираться на то, что рассматриваются реальные данные, полученные в реальной обстановке при промышленной эксплуатации.

Эвристические правила геометрической пирамиды в вопросе подсчета числа нейронов скрытого слоя для четырехслойного персептрона с двумя скрытыми слоями:

$$r = \sqrt[3]{\frac{n}{m}}, k_1 = mr^2, k_2 = mr,$$

где k – число нейронов скрытого слоя; n – число нейронов входного слоя; m – число нейронов выходного слоя; k_1 – число нейронов первого скрытого слоя; k_2 – число нейронов второго скрытого слоя.

На основании приведенных выводов оптимальная структура нейронной сети определяется как (2, 4, 4, 1) (рис. 1).

В качестве обучающей выборки использованы большие данные двух статистик: первая – с действующего оборудования комплекса учета энергопотребления Алатырского объединения «Чувашэнерго», вторая – в рамках лабораторного эксперимента, проводимого на площадке факультета энергетике и электротехники в Чувашском государственном университете

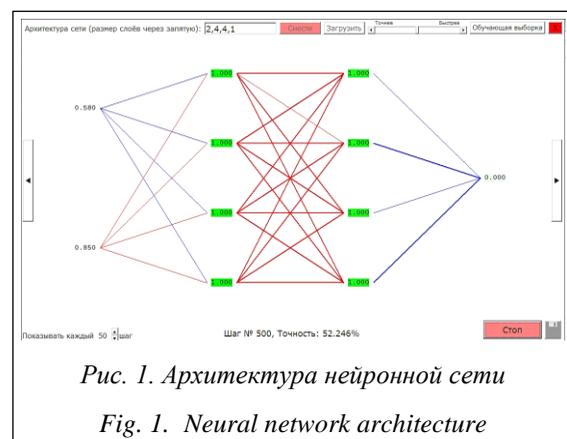


Рис. 1. Архитектура нейронной сети

Fig. 1. Neural network architecture

им. И.Н. Ульянова. Векторы данных, содержащих сведения о режимах работы («НОРМА», «НЕИСПРАВНОСТЬ» и «НЕ ОПРЕДЕЛЕНО»), подаются на разные модели ИНС с различным числом нейронов скрытого слоя. Некоторая часть статистики, участвующей в обучении, представлена в таблице.

На втором этапе осуществляется обучение нейронной сети, заключающееся в подборе весовых коэффициентов для выявления аномальных значений показаний приборов энергопотребления с малой погрешностью появления.

Оконечное устройство, например, электросчетчик, формирует показания в виде текстового файла. Показания электросчетчика отражаются следующим образом: в первой строке – дата предыдущего снятия показания электросчетчика, само показание и заводской номер электросчетчика, во второй – те же параметры, но с текущими датой и показанием счетчика, в третьей – название организации (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2024-2/15.jpg>).

На рисунке 2 представлена диаграмма рассеяния режимов работы приборов учета электропотребления, где в круге выделены аномальные показания счетчиков электроэнергии (неисправность оборудования, выход из строя трансформатора, обрыв линии) либо человеческий фактор (невнимательность оператора, хищение абонентами).

Анализ результатов работы программного инструмента

Разработанный программный инструмент CR_Energy применяется для цифрового модуля передачи показаний приборов энергопотребления, схема которого согласована с производителем автоматизированной информационно-измерительной системы дистанционного сбора и передачи удаленных данных (ОАО «Электроавтомат», г. Алатырь).

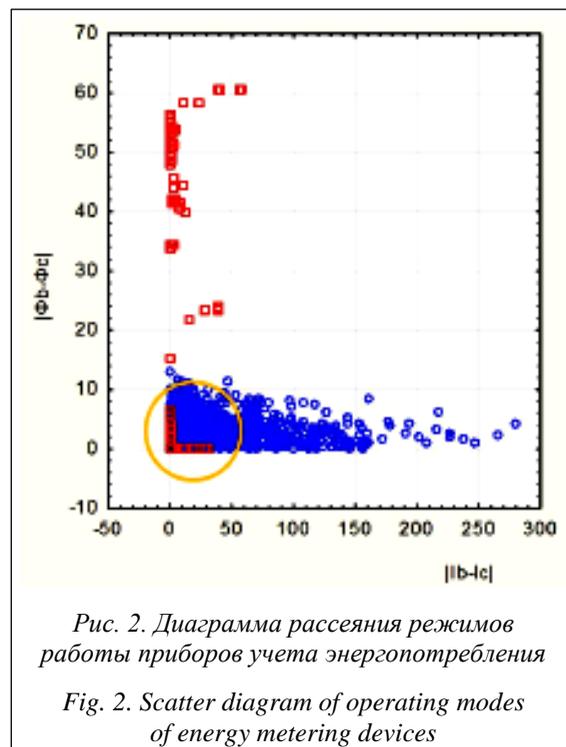


Рис. 2. Диаграмма рассеяния режимов работы приборов учета энергопотребления
Fig. 2. Scatter diagram of operating modes of energy metering devices

Для этого спроектирована автоматизированная информационно-измерительная система дистанционного сбора и передачи удаленных данных. Система предназначена для дистанционного сбора, обработки, хранения и передачи информации о потреблении и балансе энергоресурсов. Ее основной отличительной особенностью является использование для передачи данных нелицензируемых диапазонов частот 433 МГц, 868 МГц, 2 400 МГц, а также других каналов связи. Развертывание системы сводится к установке индивидуальных, общедомовых и балансовых приборов учета, аппаратуры каналов связи, построению сети и организации диспетчерских пунктов.

Состав оборудования системы: приборы учета (счетчики) – любые приборы учета с им-

Статистика входных параметров нейронной сети

Statistics of neural network input parameters

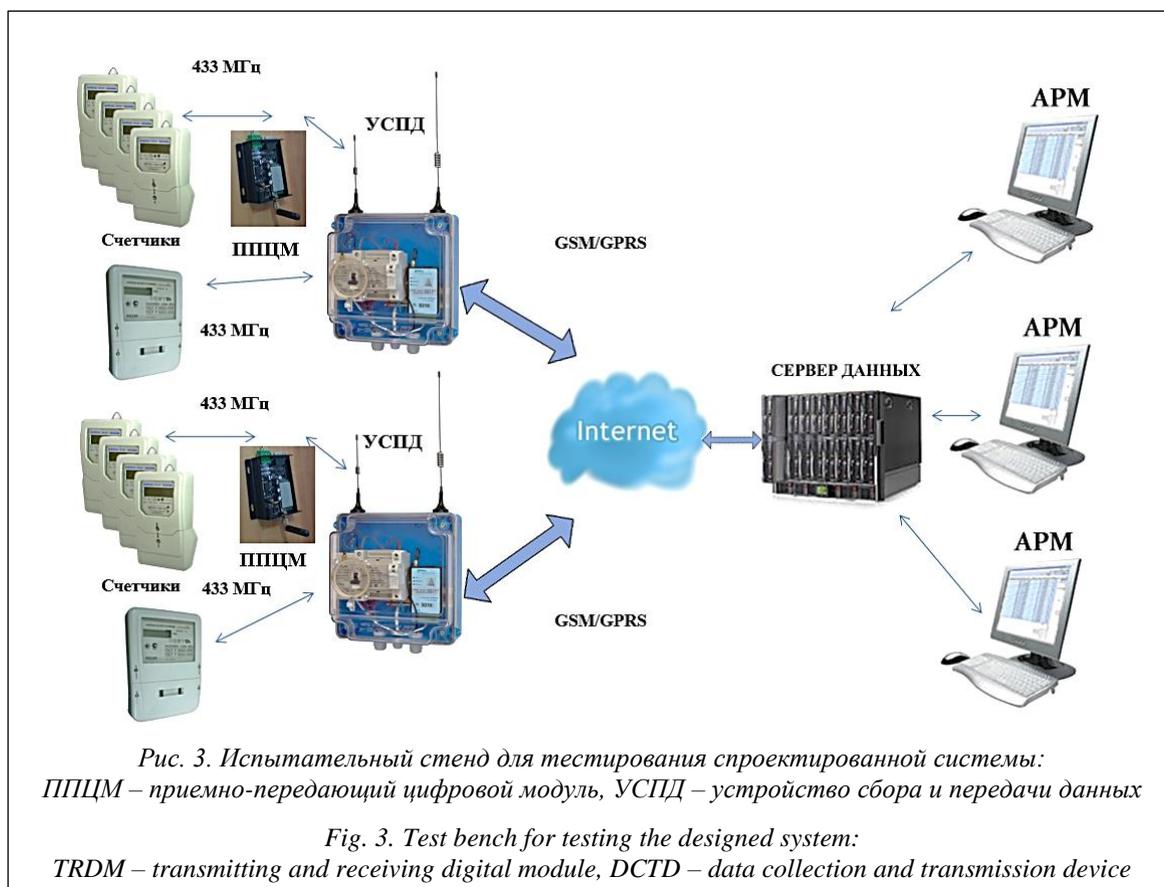
$ U_A - U_B , В$	$ U_A - U_C , В$	$ U_C - U_A , В$	$ I_A - I_B , мА$	$ I_B - I_C , мА$	$ I_C - I_A , мА$	Заключение
0,01	0,89	0,88	0,7	0,2	0,5	НОРМА
4,4	0,75	3,8	1,2	1,1	0,1	НОРМА
0,28	2,1	1,8	1,4	0,2	1,2	НОРМА
3,9	0,05	3,9	12	12	0	НЕИСПРАВНОСТЬ
0,83	4,8	5,7	0,1	0,5	0,6	НЕИСПРАВНОСТЬ
0,34	1,5	1,1	1,3	0,2	1,5	НЕИСПРАВНОСТЬ
5,3	2,7	2,7	0	0	0	НЕ ОПРЕДЕЛЕНО
4,9	2,7	2,2	0	0	0	НЕ ОПРЕДЕЛЕНО
1,9	2,1	0,21	0	0	0	НЕ ОПРЕДЕЛЕНО

пульсным выходом; приемно-передающий цифровой модуль – устройство сбора, регистрации и передачи данных по радиоканалам; ретранслятор – устройство приема и передачи данных, работающее в режиме ретрансляции; мастер считывания данных – устройство сбора и передачи данных по радиоканалам; стационарный или мобильный компьютер; разработанное ПО CR_Energy; коммутационные устройства.

Основные возможности системы: дистанционная передача данных; расчеты на основе фактических данных о потребленных энергоресурсах; возможность выявления хищений; возможность дистанционного ограничения или отключения; дистанционная настройка параметров; возможность передачи данных на значительное расстояние с использованием режима ретрансляции; преобразование полученных данных в различные форматы, возможность работы в любых стандартных программах; сохранение полученных данных в течение 30 лет; двухуровневая защита информации – аппаратная и программная; мобильный съем показаний при помощи мастера сбора данных и ноутбука; максимальное количество точек учета – 65 534 или 216 (определяется разрядностью контроллера).

В рамках заключительного пункта проведения исследований сотрудниками предприятия-изготовителя счетчиков электрической энергии совместно с авторами разработан испытательный стенд по тестированию вновь созданной цифровой технологии удаленного сканирования и предсказания показаний счетчиков электрической энергии для отечественных производителей (рис. 3). Данный стенд прошел испытания для счетчиков электрической энергии (ЭЛТА-1, ЭЛТА-3) при передаче данных по радиоканалу.

Проведено тестирование разработанной автоматизированной информационно-измерительной системы дистанционного сбора и передачи удаленных данных на предприятии-изготовителе умных счетчиков электрической энергии с радиоканалом. Выявлены основные достоинства системы: возможность интеграции к установленным счетчикам электрической энергии независимо от марки и производителя; возможность адаптации получаемой информации к любой системе обработки данных; относительно невысокая стоимость оборудования; возможность дистанционного ограничения или отключения энергопотребления при необходимости; ведение учета и контроля потребления



энергоресурсов в реальном времени, сведение баланса на объектах; использование нелицензированных диапазонов частот; надежность работы системы; простота монтажа и эксплуатации.

Заключение и дальнейшие перспективы исследования

В результате исследований разработаны оригинальная математическая модель нейронной сети, алгоритм работы и программное средство, позволяющее сократить временные трудозатраты операторов учета и экономические потери предприятия энергосбыта, а также периодически снимать необходимость задействования автотранспорта для доставки электротехнического персонала к местам расположения распределительных подстанций.

Разработана модель нейронной сети и создан прототип программного инструмента, а также осуществлено прогнозирование показателей реальных счетчиков электрической энергии на предприятиях-изготовителях с помощью возможностей разработанного программного инструмента.

На программу для ЭВМ получено свидетельство о госрегистрации № 2022683810.

В перспективе с внедрением разработанной модели и программного инструмента в десятки раз повысится эффективность информационно-измерительных систем контроля за функционированием узла энергопотребления. Внедрение разработанного метода контроля функционирования на основе ИНС с проведением соответствующей модернизации систем учета цифровых подстанций позволит решить проблему недостоверного учета электроэнергии.

Список литературы

1. Крикунов И.С. Основные тенденции интенсификации электроэнергетики Российской Федерации с помощью информационных технологий // Междунар. журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2022. Т. 7. № 4. С. 22–27.
2. Пешнин С.Е. Прорывные технологии прогноза в электроэнергетике анализаторами качества электроэнергии с искусственной нейронной сетью // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 4. С. 24–32.
3. Солдатов А.А., Дубровина О.А., Жидяева Т.П. Исследование вопроса недостоверности учета электроэнергии на базовых подстанциях предприятий электроэнергетической отрасли // Актуальные вопросы современной науки: достижения и инновации: матер. Междунар. науч.-практич. конф. 2022. С. 111–115.
4. Юндин К.М., Хорольский В.Я., Исупова А.М., Руденко Н.Б. Методология выбора технических мероприятий по снижению потерь электрической энергии в практике эксплуатации сельских электрических сетей // Энергобезопасность и энергосбережение. 2023. № 4. С. 10–17.
5. Egorov A., Kochneva E., Larionova A., Lyukhanov E., Shender S.E. On-line electrical energy balance monitoring system for power networks enterprise facilities. Proc. RTUCON, 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982253.
6. Алексеева Н.Н., Дулепов Д.Е. Применение методов теории систем для определения использования оптимального числа устройств синхронизированных фазных измерений в энергосистемах // Вестн. НИЭИ. 2020. № 12. С. 28–37.
7. Вуколов В.Ю., Алексеев Л.Л., Осокин С.В. Оценка достоверности показаний коммерческого и технического учета электроэнергии в сетях промышленных предприятий // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бенардосовские чтения): матер. Междунар. науч.-технич. конф. 2021. С. 236–239.
8. Симонов Н., Ивнев Н. Опыт и перспективы применения искусственных нейронных сетей в электроэнергетике // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 54. С. 42–48.
9. Унижаев Н.В. Особенности внедрения нейросетей и систем искусственного интеллекта на предприятиях электроэнергетики // Вопросы инновационной экономики. 2023. Т. 13. № 1. С. 215–232. doi: 10.18334/vinec.13.1.116945.
10. Калинин А.Е. Сравнительный анализ методов выявления аномального уровня электропотребления // ППРЭЭ: матер. III науч.-практич. конф. 2021. С. 203–208.

Neural network method and a software tool for estimating power losses

Vladimir N. Pichugin ✉¹, Anton A. Soldatov¹, Evgeniya R. Tyuryushova¹

¹I.N. Ulyanov Chuvash state University, Cheboksary, 428015, Russian Federation

For citation

Pichugin, V.N., Soldatov, A.A., Tyuryushova, E.R. (2024) 'Neural network method and a software tool for estimating power losses', *Software & Systems*, 37(2), pp. 289–294 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.142.289-294

Article info

Received: 15.11.2023

After revision: 11.01.2024

Accepted: 05.02.2024

Abstract. Electric power companies face the problems of large economic losses due to unreliable electricity metering. The paper considers the process of collecting remote electricity metering data, for example, digital substations of enterprises and network companies engaged in electricity transmission. For this purpose, a digital module is placed at a remote substation that allows scanning electricity meter readings. The purpose of the study is to implement a software tool for processing and predicting data obtained using a digital radio receiver module for detection, identification and remote data transmission based on fractal antennas. The software tool was developed in the Visual Studio 2019 integrated environment using original libraries on the Windows platform. All object properties are available for modification, the interface form and visual components are created both during the design process and during compilation. A statistical method and the method of an artificial neural network of a multilayer perceptron were used to programmatically assess misreporting of electrical energy according to indications. Such methods of big data research based on analyzing electric energy meter readings, which are formed due to monthly collection, allow assuming their inconsistencies with standards, characteristics and a non-accounting type, the amount of losses, etc. The main result of the study is a new neural network method for detecting power loss data, which allows identifying incorrect commercial data of electric meter readings. The main practical result is developing a software tool for a digital module for transmitting readings of energy consumption devices. The module uses smart algorithms of the method to account inconsistencies in data on transmitted electricity at digital substations of PJSC ROSSETI.

Keywords: neural network method, unreliable electricity metering, incorrect commercial data of electricity meter readings, digital substations of a network company

Acknowledgements. The work was financially supported by the Innovation Promotion Fund in terms of the federal project "University technological entrepreneurship platform", contract no. 303ГССС15-Л/78984

References

1. Krikunov, I.S. (2022) 'The main trends in the intensification of the electric power sector of the Russian Federation with the help of information technologies', *Int. J. of Information Technology and Energy Efficiency*, 7(4), pp. 22–27 (in Russ.).
2. Peshnin, S.E. (2021) 'Breakthrough forecasting technologies in the electric power industry with power quality analyzers with an artificial neural network', *Electric Power. Transmission and Distribution*, (4), pp. 24–32 (in Russ.).
3. Soldatov, A.A., Dubrovina, O.A., Zhidyayeva, T.P. (2022) 'Investigation of the question of unreliability of electricity metering at the basic substations of the power industry enterprises', *Proc. Current Issues of Modern Science: Achievements and Innovations*, pp. 111–115 (in Russ.).
4. Yundin, K.M., Khorolskey, V.Ya., Isupova, A.M., Rudenko, N.B. (2023) 'Methodology for selecting technical measures of reducing losses in rural electrical grids', *Energy Security and Energy Saving*, (4), pp. 10–17 (in Russ.).
5. Egorov, A., Kochneva, E., Larionova, A., Lyukhanov, E., Shender, S.E. (2019) 'On-line electrical energy balance monitoring system for power networks. enterprise facilities', *Proc. RTUCON*, pp. 1–4. doi: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982253.
6. Alekseeva, N.N., Dulepov, D.E. (2020) 'Application of methods of system theory to determine the use of the optimal number of devices for synchronized phase measurements in power systems', *Bull. NGIEI*, (12), pp. 28–37 (in Russ.).
7. Vukolov, V.Yu., Alekseev, L.L., Osokin, S.V. (2021) 'Assessment of the reliability of commercial and technical metering of electricity in the grids of industrial enterprises', *Proc. State and Prospects of Development of Electrical and Thermal Technology (XXI Benardos Readings)*, pp. 236–239 (in Russ.).
8. Simonov, N., Ivenev, N. (2019) 'Experience and prospects of using artificial neural networks in the electric power industry', *Electric Power. Transmission and Distribution*, (S4), pp. 42–48 (in Russ.).
9. Unizhaev, N.V. (2023) 'Particularities of the introduction of neural networks and artificial intelligence systems at power companies', *Russ. J. of Innovation Economics*, 13, (1), pp. 215–232 (in Russ.). doi: 10.18334/vinec.13.1.116945.
10. Kalinin, A.E. (2021) 'Comparative analysis of methods for detecting anomalous level of electric consumption', *Proc. III Sci-Pract. Conf. PPEE*, pp. 203–208 (in Russ.).

Авторы

Пичугин Владимир Николаевич¹,

к.т.н., доцент, зав. кафедрой,

vladimir_iii@mail.ru

Солдатов Антон Александрович¹,

к.т.н., доцент, aa.soldatov@bk.ru

Тюрюшова Евгения Романовна¹,

студент, evgenia.kleopatra@yandex.ru

Authors

Vladimir N. Pichugin¹,

Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor,

Head of Chair, vladimir_iii@mail.ru

Anton A. Soldatov¹, Cand. of Sci. (Engineering),

Associate Professor, aa.soldatov@bk.ru

Evgeniya R. Tyuryushova¹, Student,

evgenia.kleopatra@yandex.ru

¹ Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, 428015, Россия

¹ I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, 428015, Russian Federation