

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-2-289-298

УДК 004.032.4 004.032.2

Методика управления компонентами распределительной электроэнергетической системы при обеспечении качества потребляемой электроэнергии

Андрей Евгеньевич Мозохин¹, Владимир Николаевич Шведенко²✉

¹ Группа компаний «СИГМА», Москва, 119048, Российская Федерация

² Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук, Москва, 125190, Российская Федерация

¹ mozokhin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4673-8425>

² vv_shved@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3223-4982>

Аннотация

Предмет исследования. Электроэнергетическая система представляет собой сложную организационную структуру, которая обеспечивает рабочее взаимодействие для входящих в нее интеллектуальных электронных устройств, за счет определения их ролей, каналов связи и полномочий. Система управления современной электроэнергетической системой должна обеспечивать согласованность работы интеллектуальных электронных устройств на технологических этапах генерации, транспорта, распределения и потребления энергии. Недостатком существующих систем управления технологическими процессами в таких системах является использование иерархической структуры управления применительно к сетевой топологии. Это приводит к возникновению конфликтов ресурсов и процессов на этапах генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии. Несогласованная работа устройств управления приводит к снижению эффективности функционирования энергетических объектов, что негативно влияет на качество электроэнергии в сети электроснабжения. **Метод.** Для синхронизации работы распределенных по сети интеллектуальных электронных устройств предложено обеспечивать их совместную работу через единый информационный центр в цифровой среде. При этом управление режимами работы сети электроснабжения осуществлено с применением цифровых двойников компонентов. **Основные результаты.** Цифровые двойники объектов электроэнергетической системы выполняют прогнозирование показателей качества электроэнергии, имитируют режимы работы взаимодействующих устройств в цифровой среде, а также контролируют управление компонентами сети электроснабжения для обеспечения рационального режима работы. Для достижения универсальности и быстродействия системы управления использован аппарат нечетких искусственных нейронных сетей, а для лучшего прогнозирования показателей качества электроэнергии в сети — ансамбли искусственных нейронных сетей. **Практическая значимость.** Разработана методика управления качеством электроэнергии на участках распределительной электрической сети с применением цифровых двойников, обеспечивающих взаимосвязь контролируемых показателей качества электроэнергии и регулируемых величин исполнительных механизмов интеллектуальных электронных устройств.

Ключевые слова

система управления, цифровой двойник, ансамбль искусственных нейронных сетей, электроэнергетическая система, интеллектуальные электронные устройства, показатели качества электроэнергии

Ссылка для цитирования: Мозохин А.Е., Шведенко В.Н. Методика управления компонентами распределительной электроэнергетической системы при обеспечении качества потребляемой электроэнергии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 2. С. 289–298. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-2-289-298

Methodology for the control of electric power distribution system components to ensure the quality of consumed electricity

Andrey E. Mozokhin¹, Vladimir N. Shvedenko²✉

¹ SIGMA Group of Companies, Moscow, 119048, Russian Federation

² The Russian Institute of Scientific and Technical Information of the RAS, Moscow, 125190, Russian Federation

¹ mozokhin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4673-8425>

² vv_shved@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3223-4982>

Abstract

Electric power system is a complex organizational structure that provides working interaction for its constituent intelligent electronic devices by defining their roles, communication channels, and powers. The control system of a modern electric power system must ensure the coordination of operation of intelligent electronic devices at the technological stages of power generation, transport, distribution, and consumption. The disadvantage of existing process control systems in electric power systems is the use of a hierarchical control structure in relation to the network topology. This fact leads to conflicts of resources and processes at the stages of generation, transport, distribution, and consumption of electricity. Uncoordinated operation of control devices leads to a decrease in the efficiency of power facilities which negatively affects the quality of electricity in the power supply network. To synchronize the work of intelligent electronic devices distributed over the network, it is proposed to provide their joint work through a single information center in a digital environment. At the same time, it is proposed to control the modes of operation of the power supply network using digital twins of its components. Digital twins of electric power system objects control power quality indicators, simulate the modes of interacting devices in a digital environment, and perform control of power supply network components to ensure a rational mode of their operation. To achieve the universality and speed of the control system it is proposed to use the apparatus of fuzzy artificial neural networks, and for better prediction of power quality indicators in the network — ensembles of artificial neural networks. A methodology for controlling the quality of electricity at sections of the electricity distribution network was developed using digital twins that ensure the relationship between the monitored indicators of electricity quality and regulated values of the actuators of intelligent electronic devices.

Keywords

control system, digital twin, ensemble of artificial neural networks, electric power system, intelligent electronic devices, power quality indicators

For citation: Mozokhin A.E., Shvedenko V.N. Methodology for the control of electric power distribution system components to ensure the quality of consumed electricity. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 2, pp. 289–298. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-2-289-298

Введение

Концепция «Цифровая трансформация 2030», разработанная ПАО «Россети», указывает на необходимость масштабных преобразований в сфере энергетики и создания новых способов управления компонентами электроэнергетической системы (ЭЭС)¹. Попытки интеграции данных интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) генераторов, электрических подстанций, высоковольтных линий электропередач и энергопринимающих устройств потребителей в единую информационную систему приводят к различным проблемам. Данные проблемы связаны с отсутствием единого стандарта информационного обмена между технологическими и корпоративными информационными системами, слабой согласованностью работы организационных структур, генерацией избыточного трафика в сети и рядом других факторов [1, 2].

Цифровая трансформация энергетической отрасли позволит сформировать новую инфраструктуру для максимально эффективного технологического и бизнес-взаимодействия между субъектами энергетики. При этом высокий уровень надежности и бесперебойности электроснабжения потребителей будет зависеть

от наблюдаемости и управляемости на всех этапах технологического процесса производства, транспорта и потребления электроэнергии. Отсутствие системы управления качеством электроэнергии усложняет доступ потребителей в сеть, а также приводит к снижению производительности энергопринимающих устройств в сети, к неэффективному расходованию электроэнергии и снижению ее показателей качества [3, 4].

Проблема обеспечения качества электроэнергии остро стоит в существующих системах электроснабжения. В связи с чем при разработке современных систем управления ЭЭС требуется учитывать влияние на их работу показателей качества электроэнергии (ПКЭ). Количество ПКЭ, которые возможно измерить с помощью цифровых измерительных приборов достигает десятка показателей, но для принятия эффективных управленческих решений требуются лишь те, контроль которых осуществляется в режиме реального времени. К таким показателям относятся: коэффициент мощности, падение напряжения и коэффициент несимметрии напряжения [5, 6]. Чтобы использовать эти показатели в системе управления, их нужно контролировать на всех участках распределенной ЭЭС. При этом заранее неизвестно, какие из них будут влиять на производительность работы энергообъектов, поэтому требуется эффективная система имитационного моделирования работы сети.

Наиболее подходящие инструменты для решения проблемы управления качеством электроэнергии в мно-

¹ Концепция «Цифровая трансформация 2030» [Электронный ресурс] // Публичное акционерное общество Российские сети. Режим доступа: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf (дата обращения: 10.01.2023).

гоконтурной распределенной системе энергоснабжения — цифровые двойники компонентов ЭЭС. Такие компоненты могут взаимодействовать между собой для прогнозирования, анализа и управления сетевой структурой электроснабжения [7, 8].

В работах [9–11] рассмотрены основные тенденции совершенствования систем управления сетевыми структурами энергетических систем в условиях цифровой трансформации энергетической отрасли. В [12–14] представлены возможные варианты применения технологии цифровых двойников для управления объектами ЭЭС. Отметим, что рассмотренные задачи ограничиваются узкой областью моделирования и автоматизации сетевых объектов электроснабжения.

Цифровой двойник имеет ряд преимуществ при использовании в системах управления. Они связаны с возможностью агрегации данных с различных ИЭУ сети и установлением скрытых взаимосвязей между компонентами в цифровой среде для синхронизации работы распределенной ЭЭС. Данные преимущества делают технологию цифровых двойников универсальным инструментом для моделирования энергетических систем любой сложности, включая распределенную генерацию, возобновляемые источники энергии и умные пространства.

В настоящей работе рассмотрена распределенная информационная система управления качеством электроэнергии в ЭЭС. Система позволит исследовать с точки зрения системных позиций процессы генерации, транспорт, распределения и потребления энергии, а также их информационное взаимодействие и выработку предиктивных воздействий путем имитационного моделирования режимов работы компонентов ЭЭС средствами цифровых двойников.

Постановка задачи исследования

Предположим, что энергетическое и информационное пространства ЭЭС — сложная система, которая относится к классу система систем. Исследуемый участок сети предназначен для распределения электроэнергии от питающего центра до потребителей. Общая численность потребителей на фидере 5 трансформаторной подстанции Бабаево около 1000 человек. Сеть состоит из питающего центра, коммутационных аппаратов, воздушных линий электропередачи, потребителей электроэнергии и ИЭУ. На рассматриваемом участке электрической сети в качестве ИЭУ использованы следующие устройства: синхронный компенсатор с плавным регулированием реактивной мощности (расположен на трансформаторной подстанции), регулятор напряжения типа бустер находится на воздушных линиях электропередачи, симметрирующее устройство с емкостными элементами размещено на вводе потребителя электроэнергии. Однолинейная схема участка сети электроснабжения показана на рис. 1.

При проектировании рассматриваемого участка сети с активными устройствами управления и регулирования не было предусмотрено автоматическое воздействие устройств на параметры и конфигурацию сети. Конструктивно устройства могут регулировать величину реактивной мощности и напряжения в сети. Однако отсутствие информационного взаимодействия между ИЭУ не позволяет согласовать режимы работы устройств для поддержания ПКЭ в сети электроснабжения. В связи с этим возникла необходимость разработки универсальной методики управления ПКЭ в сети, для различных типов и функциональных возможностей устройств.

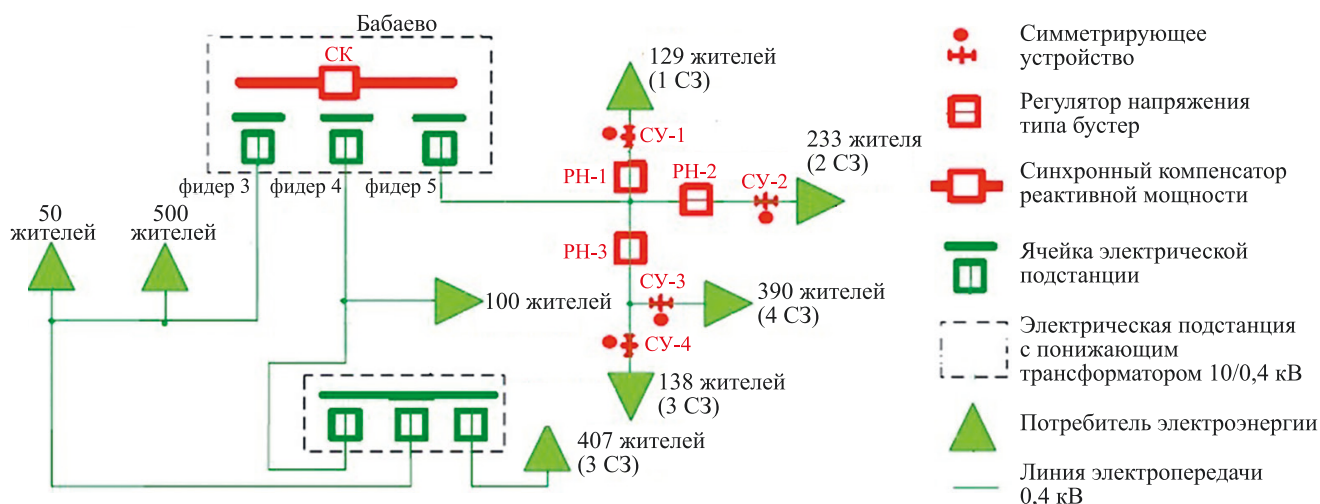


Рис. 1. Однолинейная схема участка электрической сети с интеллектуальными электронными устройствами.

СУ — симметрирующее устройство; РН — регулятор напряжения типа бустер; СК — синхронный компенсатор реактивной мощности; СЗ — социально-значимый объект электроснабжения

Fig. 1. Single-line diagram of electric network section with intelligent electronic devices.

CY — symmetrical device, PH — voltage regulator booster type, CK — synchronous reactive power compensator, C3 — socially significant object of electric supply

Цифровые двойники в системе управления распределенной сетевой структурой ЭЭС

Для анализа поступающей от ИЭУ первичной информации и реализации распределенного управления требуется трансляция данных физических объектов в цифровую среду, где будет осуществляться моделирование и расчет рациональных режимов совместной работы киберфизических устройств.

Цифровая среда ЭЭС — виртуальный аналог физической среды, в которой данные о состоянии компонентов ЭЭС используются для анализа, синтеза и обработки, с целью моделирования реальных процессов и формирования управляющего воздействия на объекты физической среды. В цифровой среде полезные данные применяются для создания цифровых двойников компонентов ЭЭС и системы в целом. В результате ЭЭС состоит из множества разноплановых цифровых двойников компонентов, взаимосвязанных через информационные потоки. Порядок формирования цифровых двойников компонентов ЭЭС и определение связей между реальными и виртуальными объектами подробно рассмотрен в работе [15].

В развитии концепции распределенной системы управления ресурсопотреблением и процессами в ЭЭС с применением технологии цифровых двойников [16] на рис. 2 представлена схема связи ИЭУ, расположенных в сети электроснабжения, через единый информационный центр согласования режимов работы. Взаимодействие ИЭУ через единый центр осуществлено с применением двунаправленных связей типов «энергия–информация», «информация–энергия», «информация–информация»; 4 — единый информационный центр согласования режимов работы устройств; 5 — блок управления режимами работы киберфизических устройств; 6 — блок фильтрации входной информации; 7 — граница физической и виртуальной сред

Таким образом, управление ЭЭС возможно выполнить с помощью цифровых двойников компонентов ЭЭС, связанных между собой через центр согласования целевых ориентиров в единой цифровой среде ЭЭС. В цифровой среде в процессе рекурсивного управления создается сетевая структура взаимодействующих по средствам двунаправленных связей цифровых двойников компонентов ЭЭС. Рекурсия проводится непрерывно по мере поступления информации от источников данных. Синтез цифровых двойников компонентов на основании рекурсии в результате позволяет создать цифровой двойник ЭЭС в единой цифровой среде.

Для синхронизации работы распределенных ИЭУ в сети с целью поддержания качественного электроснабжения потребителей требуется сформировать дерево целей управления.

Дерево целей системы управления качеством электроэнергии в сети

Особенность использования первичной информации для формирования цифровых двойников компонентов ЭЭС состоит в разработке многоуровневого представления дерева целей. Дерево целей способствует решению оперативных, тактических и стратегических задач системы управления, поддержания качества электроэнергии в сети и обеспечивает согласованную работу ИЭУ.

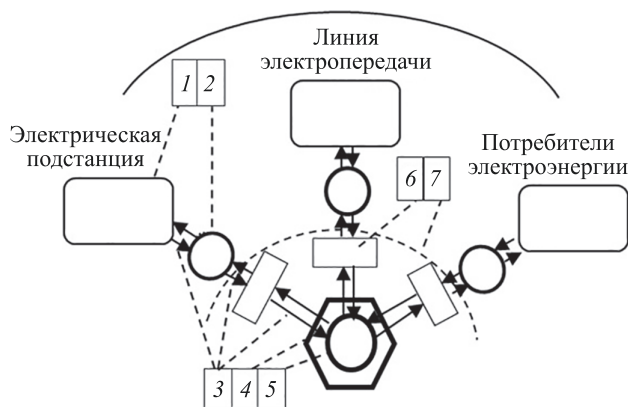


Рис. 2. Схема взаимодействия киберфизических устройств контроля и управления качеством электроэнергии в сети.

1 — компоненты электроэнергетической системы с интеллектуальными электронными устройствами; 2 — цифровые измерители показателей качества электроэнергии в сети; 3 — двунаправленные связи типов «энергия–информация», «информация–энергия», «информация–информация»; 4 — единый информационный центр согласования режимов работы устройств; 5 — блок управления режимами работы киберфизических устройств; 6 — блок фильтрации входной информации; 7 — граница физической и виртуальной сред

Fig. 2. Scheme of interaction of cyberphysical devices of control and management of power quality in the network, where 1 — components of the electric power system with intelligent electronic devices; 2 — digital power quality meters in the network; 3 — bidirectional links of “energy–information”, “information–energy”, “information–information”; 4 — a single information center of coordination of the devices operating modes; 5 — unit control modes of cyberphysical devices; 6 — input information filtering unit; 7 — boundary of physical and virtual environment

Информация о состоянии электрической сети, собранная с первичных Internet of Things (IoT)-устройств ее компонентов, используется для формирования дерева целей системы управления качеством электроэнергии, которое представлено на рис. 3. Первый уровень дерева

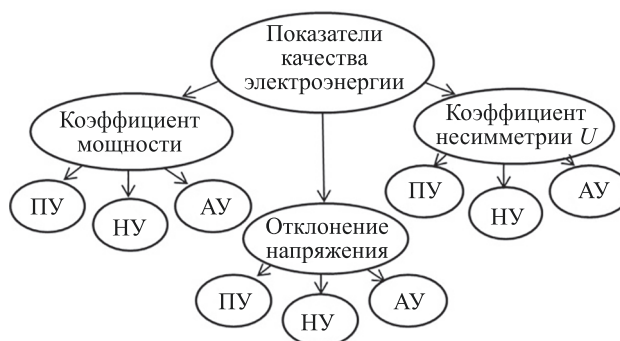


Рис. 3. Дерево целей показателей качества электроэнергии в сети.

ПУ — предупредительный уровень; НУ — нормативный уровень; АУ — аварийный уровень значений показателей качества электроэнергии в сети

Fig. 3. Target tree of power quality indicators in the network, where ПУ — preventive level, НУ — normative level, АУ — alarm level of values of power quality indicators in the network

целей — поддержание ПКЭ в сети для потребителей в местах их постоянного пребывания (бытовых и производственных). Второй уровень дерева целей состоит из трех ветвей, включающих поддержание на требуемом уровне контролируемых ПКЭ: коэффициента мощности, отклонения напряжения и коэффициента несимметрии напряжения (U). Третий уровень дерева целей состоит из ряда характеристик контролируемых ПКЭ, включая их нормативные, предупредительные и аварийные пределы.

Система управления качеством электроэнергии в сети должна принимать, обрабатывать и накапливать информацию для выработки оперативных, тактических и стратегических решений. В связи с этим сформированному дереву целей должна соответствовать интегрированная информационная система управления.

Разработка алгоритма управления синхронным компенсатором реактивной мощности на основе нечетких искусственных нейронных сетей

Наиболее перспективное направление в области управления ИЭУ в сети электроснабжения на сегодняшний день — использование математического аппарата нечетких искусственных нейронных сетей (ИНС) [17, 18].

Применение ИНС объясняется тем, что основная особенность сложных систем — наличие большого числа факторов, которые влияют на исследуемый показатель, а также ограниченный объем наблюдений данных, используемых при построении модели [19]. Отметим, что в некоторых случаях эти факторы имеют качественный характер и не могут быть измерены при помощи метрических шкал. В условиях слабой математической формализации процессов, протекающих в сложных системах, и ограниченного объема статистических данных возрастает роль экспертной информации, используемой в процессе моделирования [20]. Данные обстоятельства снижают эффективность применения известных вариантов интеллектуальной обработки данных и указывают на необходимость использования в процессе построения моделей аппарата нечетких ИНС.

Выбор данного аппарата интеллектуальной обработки данных не случаен, так нечеткие алгоритмы позволяют успешно решать задачи, в которых исходные данные являются ненадежными и слабо формализованными. При этом информационные системы, основанные на применении аппарата нечеткой логики, являются универсальными аппроксиматорами [21]. При реализации алгоритмов управления на основе нечетких ИНС необходимо учитывать свойственные алгоритмам нечеткого логического вывода недостатки, связанные с субъективностью выбора вида и параметров функций принадлежности, а также исходного набора нечетких продукционных правил. Для устранения указанных недостатков нечетких систем возможно обеспечить их адаптивность, корректируя по мере построения модели на основе реальных статистических данных правила и параметры функций принадлежности. Один из вариантов такой адаптации реализуется при построении гибридных нейронных сетей [22].

Рассмотрим разработку нейронной сети для синхронного компенсатора реактивной мощности. Выполним вычисления в среде Scilab с использованием программного пакета Fuzzy Logic. В качестве нейронной сети для обработки контролируемых ПКЭ применим многослойный перцептрон с одним скрытым слоем. Созданная гибридная нейронная сеть состоит из пяти слоев, каждый из которых решает конкретную задачу. Результат работы нейронной сети — формирование управляющего воздействия на исполнительные механизмы ИЭУ для контроля ПКЭ в сети.

Создание первичного набора данных для нейронной сети. На первый слой сети поступает информация о коэффициенте мощности ($\cos \varphi$), отклонении напряжения ($\% U$) и коэффициенте несимметрии напряжения (K_U) на участке сети, измеренные IoT-датчиками в разных точках сети (на трансформаторной подстанции, на линиях электропередачи, на вводе потребителей электроэнергии). В момент обучения нейронной сети исходные данные берутся из обучающей выборки, далее сеть обрабатывает данные о ПКЭ, полученные в режиме реального времени. Измеренные значения ($\cos \varphi$, $\% U$ и K_U) передаются на второй слой сети, где происходит этап формирования принадлежности к группе нечетких множеств.

Для формирования первичного набора данных использованы результаты экспериментальных исследований, проведенных в рамках рассматриваемого участка сети. Также учтены результаты подобных сетей электроснабжения, оснащенных ИЭУ, достижения по регулированию ПКЭ на трансформаторной подстанции, линиях электропередачи и на вводе у потребителя, а также рекомендации экспертов по работе активно-адаптивных сетей. Первичные данные разделены по группам в соответствии с их свойствами.

Формирование принадлежности входных данных к группе нечетких множеств. Функции принадлежности определяют соответствия между входными данными и нечеткими множествами.

На рис. 4, а, б показаны функции, определяющие принадлежность участка сети к одному из нечетких множеств: по коэффициенту мощности (низкому, среднему, высокому) и отклонению напряжения (высокое, допустимое, низкое).

Нечеткие множества по коэффициенту мощности и отклонению напряжения, сформированы на основании рекомендаций ГОСТ 32144-2013¹. В соответствии с рекомендациями, значение коэффициента мощности в электрической сети допустимо может находиться в пределах 0,95–1. В случае если значение снижается до 0,8, то качество электроэнергии считается низким, если меньше значения 0,8, то можно говорить о неудовлетворительных показателях качества электроснабжения, и тогда реактивная мощность по значению равна или превышает активную мощность. При получении про-

¹ ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введен 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 31 с.

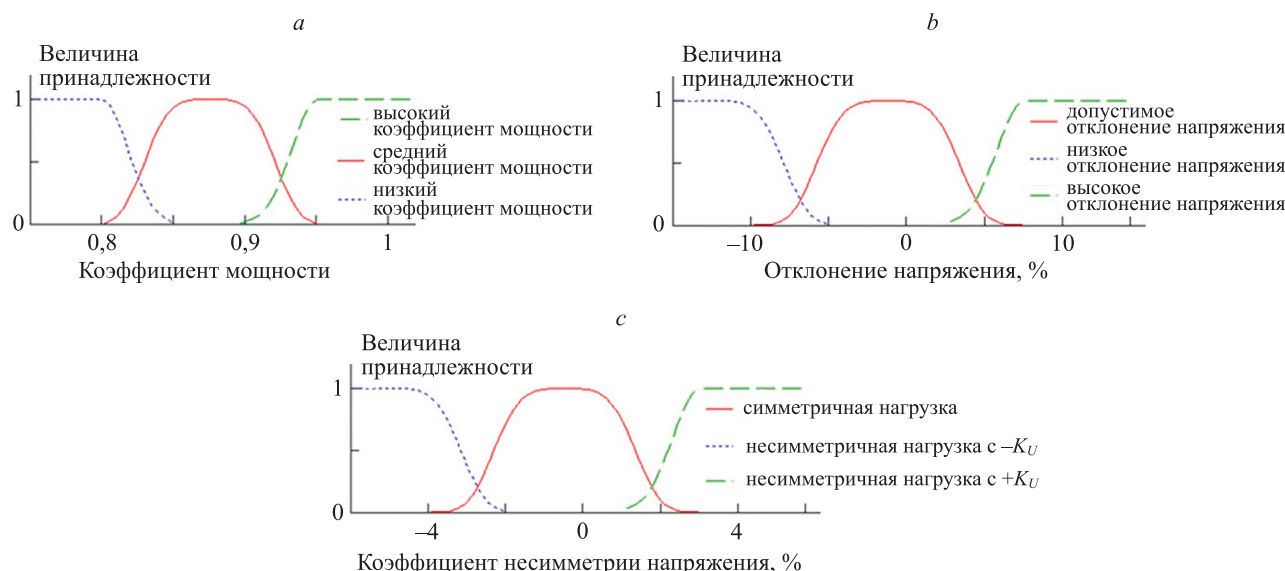


Рис. 4. Нечеткие множества для коэффициента мощности (а), отклонения напряжения (b) и коэффициента несимметрии напряжения (с) в сети (величина принадлежности является безразмерной величиной)

Fig. 4. Fuzzy sets for power factor (a), voltage deviation (b) in the network, and voltage unbalance coefficient (c) in the network

межуточных значений, коэффициент мощности можно отнести к средней группе.

Отклонение напряжения в электрической сети также делится на три группы. Значение напряжения в сети считается допустимым, если отклонение находится в диапазоне $\pm 10\%$ от его номинального значения. Если отклонение напряжения в сети выше 10% , то считается высоким, а если ниже 10% , то — низким.

Снижение качества электроэнергии также характеризуется несимметрией напряжения в трехфазной сети. В нейронной сети коэффициент несимметрии напряжения по нулевой и обратной последовательностям выполняет роль уточняющего параметра. Это означает, что коэффициент несимметрии напряжения будет уточнять режимы работы ИЭУ, которые будут получены по сочетанию двух основных параметров — коэффициента мощности и отклонения напряжения в сети.

Нечеткие множества по коэффициенту несимметрии напряжения представлены на рис. 4, с. Качественная электроэнергия характеризуется нулевым коэффициентом несимметрии, или допустимым его значением в $\pm 2\%$. Низкое качество электроэнергии связано со значением коэффициента несимметрии в $\pm 4\%$.

В результате каждому набору входных нечетких данных соответствует диапазон выходных управляющих воздействий на исполнительные аппараты ИЭУ. Для этой цели созданы правила функционирования нейронной сети.

Создание обучающей выборки и логических правил работы нейронной сети. Для формирования правил соответствия входных данных выходным, выполним исследование связи режимов работы устройств, регулирующих ПКЭ по следующим параметрам их работы: компенсация реактивной мощности (кВар); компенсация напряжения (В) с параметрами коэффициента мощности; отклонения напряжения и коэффициента несимметрии напряжения в сети.

Данные по режимам работы компенсаторов реактивной мощности используем из работ [23, 24] с большой экспериментальной базой. Также учтем рекомендации экспертов по управлению режимами работы компенсаторов реактивной мощности при поддержании требуемого значения коэффициента мощности в бытовых и промышленных сетях электроснабжения. Несмотря на то, что многие данные из известных научных справочников получены для компенсаторов реактивной мощности разных марок и годов выпуска, они остаются справедливыми для их современных аналогов.

Соответствие между входными характеристиками электрической сети и выходными параметрами регулирования опишем с помощью следующих логических правил:

$$\text{если } \cos \varphi \in \cos \varphi_i, \% U \in \% U_z \text{ и } K_U \in K_{Uj}, \\ \text{то } \Delta Q \text{ есть } \Delta Q_r, \Delta U \text{ есть } \Delta U_s,$$

где нечеткие данные: $\cos \varphi_i$ и K_{Uj} — по коэффициентам мощности и несимметрии напряжения, $\% U_z$ — по отклонению напряжения, ΔQ_r и ΔU_s — по компенсации реактивной мощности и напряжения; значения: $\cos \varphi$ и K_U — коэффициентов мощности и несимметрии напряжения, $\% U$ — отклонения напряжения, ΔQ и ΔU — коэффициентов компенсаций реактивной мощности и отклонения напряжения.

Выбор обобщенных рекомендованных режимов работы ИЭУ. На четвертом слое нейронная сеть устанавливает соответствие между входными параметрами электрической сети и рекомендованными режимами работы ИЭУ.

Оценка качества работы нейронной сети для управления режимами работы синхронного компенсатора реактивной мощности

Для оценки качества работы произведем проверку обученной нейронной сети, на способность к обобщению. Проверка выполнена на данных контрольной выборки — 75 векторов (15 % от обучающей выборки). Проведем тестирование сети по данным тестовой выборки — 150 векторов (30 % от обучающей выборки). Результаты, полученные на практике и при использовании нейронной сети, показаны на рис. 5.

По результатам тестирования нейронной сети видно, что присутствуют отклонения от реальных данных. Однако они не носят существенного характера. Так, отклонения для параметров компенсаций напряжения по абсолютной величине не превышает $\pm 0,1$ В, а для — реактивной мощности $\pm 0,15$ кВар. В результате достоверность работы сети составила 0,95 и выше. Эксперимент подтвердил преимущество использования гибридной структуры нейронной сети по сравнению с классической, которая активирует всю сеть целиком. В то время как гибридная в каждом случае активирует одну локальную нейронную сеть. Это означает, что быстродействие гибридной сети выше при одинаковой точности. Отметим также, что гибридная сеть обладает гибкой системой переобучения, позволяющей переобучать одну или несколько локальных сетей, а не всю сеть целиком.

Разработка методики управления ПКЭ в сети электроснабжения на основе использования ансамбля искусственных нейронных сетей

Для управления совместной работой распределенных ИЭУ в цифровой среде рационально использовать ансамбли ИНС. Особенность управления совместной работой нескольких киберфизических устройств — наличие единого информационного центра согласования их взаимодействия. Предиктивное управление ПКЭ сети электроснабжения в едином информационном центре происходит посредством прогнозирования изменения ПКЭ при совместной работе ИЭУ в сети за заданный промежуток времени. Источником входных данных для формирования обучающей выборки системы прогнозирования служит IoT-датчики качества электроэнергии на контролируемых участках ЭЭС.

Расчет параметров регулирования киберфизических устройств осуществляется с помощью аппарата нечетких ИНС, разработанного для каждого ИЭУ (синхронного компенсатора реактивной мощности, регулятора напряжения и симметрирующего устройства).

Экспериментальные исследования показали, что использование однотипных нейронных сетей для предиктивного управления допускает ошибку прогнозирования состояния физической среды менее 5 % в 78 % случаях [25]. Большей точности можно добиться, если объединить разнотипные нейронные сети в единую систему. Исходя из этого, для получения максимально возможной точности и универсальности выберем способ построения системы прогнозирования ПКЭ в сети на основе ансамбля нейронных сетей. Структурная схема такого алгоритма управления ПКЭ в цифровой среде приведена на рис. 6.

Видно, что алгоритм управления ПКЭ в цифровой среде наглядно иллюстрирует разработанную методику управления ИЭУ в сети в режиме реального времени. Методика управления состоит из последовательности операций, объединенных в следующие функциональные блоки: 1 — консолидация данных о ПКЭ на контролируемых участках сети (контроль и фильтрация входных данных с IoT-датчиков); 2 — имитация режимов работы устройств управления и выработка управляющих воздействий на ИЭУ компонентов ЭЭС (с применением нечетких ИНС); 3 — консолидация данных об изменениях ПКЭ на контролируемых участках сети (обработка и анализ входных данных о состоянии ПКЭ в ЭЭС); 4 — прогнозирование изменения ПКЭ на контролируемых участках сети для обеспечения согласованного режима работы киберфизических устройств; 5 — расчет изменения ПКЭ на участках сети при согласованной работе ИЭУ.

Состояние ПКЭ сети электроснабжения контролируются с помощью IoT измерителей качества, расположенных в разных точках сети: на трансформаторной подстанции, на линиях электропередачи, на вводах потребителей. Информация о ПКЭ поступает в блок 1, где производится фильтрация и подготовка данных для дальнейшей их обработки, а также в блок 4. После каждого изменения режима работы одного из киберфизических устройств система управления проводит прогнозирование изменения ПКЭ в сети электроснабжения с целью корректировки управляющего

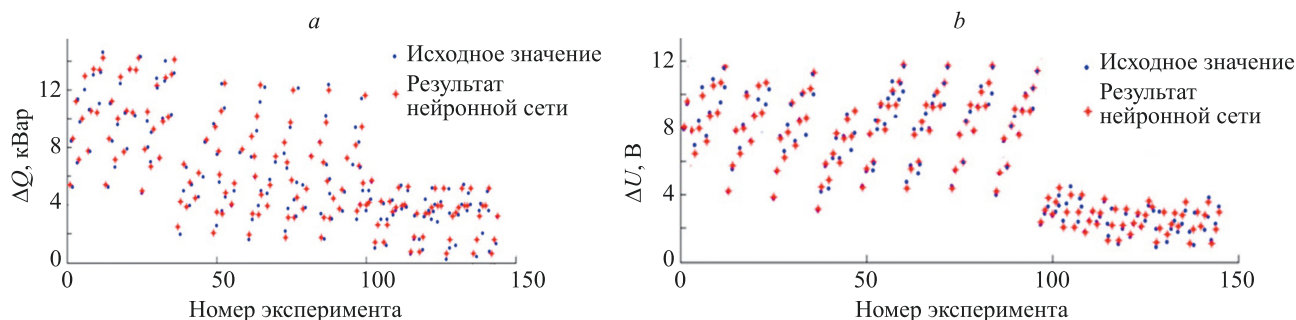


Рис. 5. Результаты испытаний величин компенсаций: реактивной мощности (a) и отклонения напряжения (b)
Fig. 5. Test results of compensation values: reactive power (a) and voltage deviation (b)

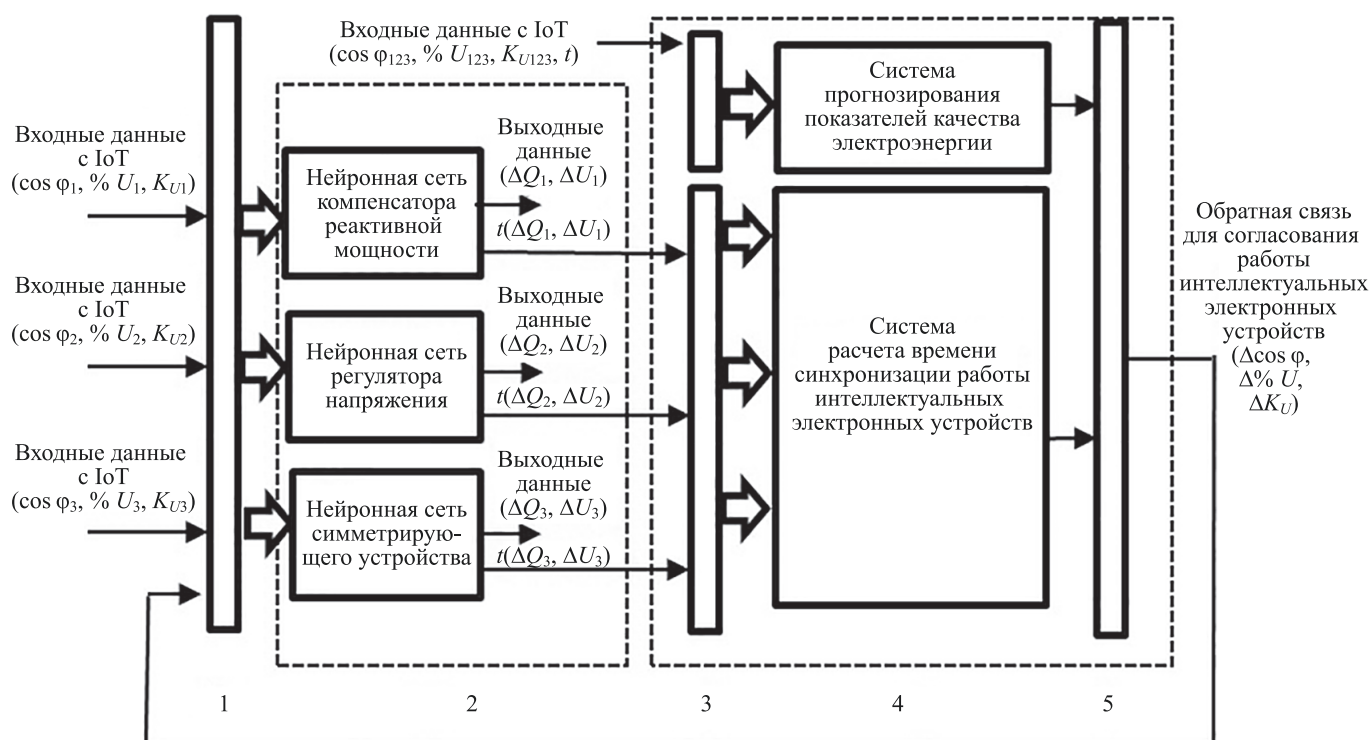


Рис. 6. Структурная схема алгоритма управления показателями качества электроэнергии в сети с использованием ансамбля нейронных сетей.

t — метка времени входных и выходных данных

Fig. 6. Block diagram of the power quality indicators control algorithm in the network using the ensemble of neural networks, where t — timestamp of input and output data

воздействия на другие устройства для согласования их совместной работы. Таким образом, управляющий сигнал проходит цепочку взаимосвязанных устройств и для каждого из них определяет рациональный режим работы при минимальных затратах времени и энергии. Согласно алгоритму, управление ПКЭ производится путем рекурсивной процедуры сбора, анализа данных и последовательного согласования управляющих воздействий на компоненты ЭЭС с ИЭУ начиная от центра питания до потребителя электроэнергии. Особенность цепочки согласования работы ИЭУ компонентов ЭЭС состоит в том, что управляющий сигнал подвергается корректировке, проходя путь согласования от центра питания до потребителя электроэнергии, так как изменение ПКЭ на центре питания влияет на ПКЭ на линиях электропередачи и далее у потребителя электроэнергии.

В среде Scilab проведен анализ применимости различных нейронных сетей для решения задачи прогнозирования изменения ПКЭ и режимов работы ИЭУ в рассматриваемой сети. Нейронные сети, показавшие наибольшую эффективность, были использованы для формирования ансамбля нейронной сети. В ансамбль объединены следующие нейронные сети: многослойный персептрон, линейная, обобщенно-регрессионная и радиальная базисная сети. На вход этих сетей переданы данные о ПКЭ на контролируемых участках сети ($\cos \varphi$, $\% U$, KU).

Заключение

Разработана методика поиска согласованных результатов работы киберфизических устройств, которая реализована в итерационном алгоритме установления режимов работы устройств с целью поддержания выходных параметров физической среды. Алгоритм реализован на примере управления интеллектуальными электронными устройствами в сети электроснабжения путем прогнозирования параметров их функционирования при помощи ансамбля искусственных нейронных сетей.

Проведен анализ методов интеллектуальной обработки данных, поступающих с сетевых устройств, для решения задач предиктивного управления интеллектуальными электронными устройствами сети электроснабжения при обеспечении качества потребляемой электроэнергии. Для достижения оптимизации процессов управления показателями качества электроэнергии в сети рекомендовано использовать аппарат нечетких искусственных нейронных сетей, а для прогнозирования состояния электроэнергетической системы — ансамбли нейронных сетей. В первом случае достигается гибкость и быстродействие системы управления, во втором — универсальность и лучшее качество прогнозирования состояния физической среды.

Предложенная методика управления компонентами распределенной электроэнергетической системы имеет ряд практических преимуществ по сравнению с суще-

ствующими узкоспециализированными решениями по автоматизации сетей электроснабжения. Во-первых, функциональный блок консолидации данных позволяет решить проблему массовой генерации данных, возникающую при некорректной работе цифровых датчиков и регуляторов в сети, применив фильтрацию входных данных и агрегацию групп параметров. Во-вторых, функциональный блок оценки изменения показателей качества электроэнергии в сети обеспечил информационные взаимодействия киберфизических

устройств в цифровой среде, что решило проблему установления скрытых взаимосвязей между данными интеллектуальных электронных устройств. В-третьих, используемая в работе технология цифровых двойников компонентов электроэнергетической системы позволяет в единой цифровой среде производить моделирование и расчеты всевозможных вариантов взаимодействия интеллектуальных электронных устройств между собой и компонентами электроэнергетической системы при сохранении их физического ресурса.

Литература

1. Мозохин А.Е., Шведенко В.Н. Анализ направлений развития цифровизации отечественных и зарубежных энергетических систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 4. С. 657–672. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-4-657-672>
2. Веселов Ф.В., Дорофеев В.В. Интеллектуальная энергосистема России как новый этап развития электроэнергетики в условиях цифровой экономики // Энергетическая политика. 2018. № 5. С. 43–52.
3. Naderi Y., Sims R., Coffele F., Xu L. Active power quality management in smart microgrids // *CIREN — Open Access Proceedings Journal*. 2020. V. 2020. N 1. P. 262–265. <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2021.0324>
4. Naderi Y., Hosseini S.H., Zadeh S.G., Mohammadi-Ivatloo B., Vasquez J.C., Guerrero J.M. An overview of power quality enhancement techniques applied to distributed generation in electrical distribution networks // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. V. 93. P. 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.013>
5. Zhang P., Feng Q., Chen R., Wang D., Ren L. Classification and identification of power quality in distribution network // *Proc. of the 5th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*. 2020. P. 533–537. <https://doi.org/10.1109/ICPRE51194.2020.9233147>
6. Chowdhury P.R., Sahu P.K., Essakiappan S., Manjrekar M., Schneider K., Laval S. Power quality and stability in a cluster of microgrids with coordinated power and energy management // *Proc. of the 2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. 2020. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/IAS44978.2020.9334828>
7. Jin S., Hogewood L., Fries S., Lambert J.H., Fiondella L., Strelzoff A., Boone J., Fleckner K., Linkov I. Resilience of cyber-physical systems: Role of AI, digital twins, and edge computing // *IEEE Engineering Management Review*. 2022. V. 50. N 2. P. 195–203. <https://doi.org/10.1109/EMR.2022.3172649>
8. Liu T., Yu H., Yin H., Zhang Z., Sui Z., Zhu D., Gao L., Li Z. Research and application of digital twin technology in power grid development business // *Proc. of the 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. 2021. P. 383–387. <https://doi.org/10.1109/ACPEE51499.2021.9436946>
9. Fu Y., Huang Y., Hou F., Li K. A brief review of digital twin in electric power industry // *Proc. of the IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. 2022. P. 2314–2318. <https://doi.org/10.1109/CIEEC54735.2022.9846081>
10. Ardebili A.A., Longo A., Ficarella A. Digital Twins bonds society with cyber-physical Energy Systems: a literature review // *Proc. of the 2021 IEEE International Conferences on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing & Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical & Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData) and IEEE Congress on Cybermatics (Cybermatics)*. 2021. P. 284–289. <https://doi.org/10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData-Cybermatics53846.2021.00054>
11. Steindl G., Stagl M., Kasper L., Kastner W., Hofmann R. Generic digital twin architecture for industrial energy systems // *Applied Science*. 2020. V. 10. N 24. P. 8903. <https://doi.org/10.3390/app10248903>
12. Kharlamova N., Traholt C., Hashemi S. A digital twin of battery energy storage systems providing frequency regulation // *Proc. of the 2022 IEEE International Systems Conference (SysCon)*. 2022. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/SysCon53536.2022.9773919>
13. Liu J., Wang S., Lu X., Li T. Research on online status evaluation technology for main equipment of power transmission and

References

1. Mozokhin A.E., Shvedenko V.N. Digitization development directions of national and foreign energy systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 657–672 (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-4-657-672>
2. Veselov F.V., Dorofeev V.V. Smart grid of Russia as a new stage of power engineering development under conditions of digital economy. *Energy Policy*, 2018, no. 5, pp. 43–52. (in Russian)
3. Naderi Y., Sims R., Coffele F., Xu L. Active power quality management in smart microgrids. *CIREN — Open Access Proceedings Journal*, 2020, vol. 2020, no. 1, pp. 262–265. <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2021.0324>
4. Naderi Y., Hosseini S.H., Zadeh S.G., Mohammadi-Ivatloo B., Vasquez J.C., Guerrero J.M. An overview of power quality enhancement techniques applied to distributed generation in electrical distribution networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 93, pp. 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.013>
5. Zhang P., Feng Q., Chen R., Wang D., Ren L. Classification and identification of power quality in distribution network. *Proc. of the 5th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, 2020, pp. 533–537. <https://doi.org/10.1109/ICPRE51194.2020.9233147>
6. Chowdhury P.R., Sahu P.K., Essakiappan S., Manjrekar M., Schneider K., Laval S. Power quality and stability in a cluster of microgrids with coordinated power and energy management. *Proc. of the 2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2020, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/IAS44978.2020.9334828>
7. Jin S., Hogewood L., Fries S., Lambert J.H., Fiondella L., Strelzoff A., Boone J., Fleckner K., Linkov I. Resilience of cyber-physical systems: Role of AI, digital twins, and edge computing. *IEEE Engineering Management Review*, 2022, vol. 50, no. 2, pp. 195–203. <https://doi.org/10.1109/EMR.2022.3172649>
8. Liu T., Yu H., Yin H., Zhang Z., Sui Z., Zhu D., Gao L., Li Z. Research and application of digital twin technology in power grid development business. *Proc. of the 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, 2021, pp. 383–387. <https://doi.org/10.1109/ACPEE51499.2021.9436946>
9. Fu Y., Huang Y., Hou F., Li K. A brief review of digital twin in electric power industry. *Proc. of the IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, 2022, pp. 2314–2318. <https://doi.org/10.1109/CIEEC54735.2022.9846081>
10. Ardebili A.A., Longo A., Ficarella A. Digital Twins bonds society with cyber-physical Energy Systems: a literature review. *Proc. of the 2021 IEEE International Conferences on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing & Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical & Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData) and IEEE Congress on Cybermatics (Cybermatics)*, 2021, pp. 284–289. <https://doi.org/10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData-Cybermatics53846.2021.00054>
11. Steindl G., Stagl M., Kasper L., Kastner W., Hofmann R. Generic digital twin architecture for industrial energy systems. *Applied Science*, 2020, vol. 10, no. 24, pp. 8903. <https://doi.org/10.3390/app10248903>
12. Kharlamova N., Traholt C., Hashemi S. A digital twin of battery energy storage systems providing frequency regulation. *Proc. of the 2022 IEEE International Systems Conference (SysCon)*, 2022, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/SysCon53536.2022.9773919>
13. Liu J., Wang S., Lu X., Li T. Research on online status evaluation technology for main equipment of power transmission and transformation based on digital twin. *Proc. of the IEEE 5th Conference*

- transformation based on digital twin // Proc. of the IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2021. P. 3368–3373. <https://doi.org/10.1109/EI252483.2021.9713501>
14. Bonetti A., Harispu C., Pitzer M., Pustejovsky M., Wetterstrand N., Kachelrieß S. Digital twin technology for virtual testing of power system relay protection // Proc. of the 3rd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), 2021. P. 154–160. <https://doi.org/10.1109/GPECOM52585.2021.9587869>
 15. Шведенко В.Н., Мозохин А.Е. Применение концепции цифровых двойников на этапах жизненного цикла производственных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 6. С. 815–827. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827>
 16. Шведенко В.Н., Мозохин А.Е. Концепция управления сетевой структурой интеллектуальных устройств в условиях цифровой трансформации энергетической отрасли // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 5. С. 748–754. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-5-748-754>
 17. Ahmed M.S., Mohamed A., Shareef H., Homod R.Z., Ali J.A. Artificial neural network based controller for home energy management considering demand response events // Proc. of the International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering (ICAEEES), 2016. P. 506–509. <https://doi.org/10.1109/icaees.2016.7888097>
 18. Isik E., Inalli M. Artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference systems approaches to forecast the meteorological data for HVAC: The case of cities for Turkey // Energy. 2018. V. 154. P. 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.069>
 19. Abdelaziz Y., Ali E.S. Cuckoo search algorithm based load frequency controller design for nonlinear interconnected power system // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2015. V. 73. P. 632–643. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.05.050>
 20. Howell S.K., Wicaksono H., Yuce B., McGlinn K., Rezgui Y. User centered neuro-fuzzy energy management through semantic-based optimization // IEEE Transactions on Cybernetics. 2019. V. 49. N 9. P. 3278–3292. <https://doi.org/10.1109/tycb.2018.2839700>
 21. Лабинский А.Ю., Неведьев С.А., Бардулин Е.Н. Использование нечеткой логики и нейронных сетей в системах автоматического управления // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2019. № 1 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-nechetkoy-logiki-i-neyronnyh-setey-v-sistemah-avtomaticheskogo-upravleniya> (дата обращения: 18.12.2022).
 22. Parvin K., Hossain Lipu M.S., Hannan M.A., Abdullah M.A., Jern K.P., Begum R.A., Mansur M., Muttaqi K.M., Indra Mahlia T.M., Dong Z.Y. Intelligent controllers and optimization algorithms for building energy management towards achieving sustainable development: challenges and prospects // IEEE Access. 2021. V. 9. P. 41577–41602. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3065087>
 23. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2000. 248 с.
 24. Кабышев А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий. Томск: ТПУ, 2012. 234 с.
 25. Yong Z., Li-Juan Y., Qian Z., Xiao-Yan S. Multi-objective optimization of building energy performance using a particle swarm optimizer with less control parameters // Journal of Building Engineering. 2020. V. 32. P. 101505. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101505>
 - on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2021, pp. 3368–3373. <https://doi.org/10.1109/EI252483.2021.9713501>
 14. Bonetti A., Harispu C., Pitzer M., Pustejovsky M., Wetterstrand N., Kachelrieß S. Digital twin technology for virtual testing of power system relay protection. *Proc. of the 3rd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, 2021, pp. 154–160. <https://doi.org/10.1109/GPECOM52585.2021.9587869>
 15. Shvedenko V.N., Mozokhin A.E. Concept of digital twins at life cycle stages of production systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 6, pp. 815–827 (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827>
 16. Shvedenko V.N., Mozokhin A.E. The concept of managing the network structure of intelligent devices in the digital transformation of the energy industry. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 5, pp. 748–754 (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-5-748-754>
 17. Ahmed M.S., Mohamed A., Shareef H., Homod R.Z., Ali J.A. Artificial neural network based controller for home energy management considering demand response events. *Proc. of the International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering (ICAEEES)*, 2016, pp. 506–509. <https://doi.org/10.1109/icaees.2016.7888097>
 18. Isik E., Inalli M. Artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference systems approaches to forecast the meteorological data for HVAC: The case of cities for Turkey. *Energy*, 2018, vol. 154, pp. 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.069>
 19. Abdelaziz Y., Ali E.S. Cuckoo search algorithm based load frequency controller design for nonlinear interconnected power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, vol. 73, pp. 632–643. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.05.050>
 20. Howell S.K., Wicaksono H., Yuce B., McGlinn K., Rezgui Y. User centered neuro-fuzzy energy management through semantic-based optimization. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, vol. 49, no. 9, pp. 3278–3292. <https://doi.org/10.1109/tycb.2018.2839700>
 21. Labinsky A.Y., Nefediev S.A., Bardulin E.N. The use of fuzzy logic and neural networks in automatic control systems. *Bulletin of St. Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*, 2019, no. 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-nechetkoy-logiki-i-neyronnyh-setey-v-sistemah-avtomaticheskogo-upravleniya> (accessed: 18.12.2022). (in Russian)
 22. Parvin K., Hossain Lipu M.S., Hannan M.A., Abdullah M.A., Jern K.P., Begum R.A., Mansur M., Muttaqi K.M., Indra Mahlia T.M., Dong Z.Y. Intelligent controllers and optimization algorithms for building energy management towards achieving sustainable development: challenges and prospects. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 41577–41602. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3065087>
 23. Kochkin V.I., Nechaev O.P. *Application of Static Reactive Power Compensators in Power Grids of Power Systems and Enterprises*. Moscow, NTs ENAS Publ., 2000, 248 p. (in Russian)
 24. Kabyshev A.V. *Reactive Power Compensation in Electrical Installations of Industrial Enterprises*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2012, 234 p. (in Russian)
 25. Yong Z., Li-Juan Y., Qian Z., Xiao-Yan S. Multi-objective optimization of building energy performance using a particle swarm optimizer with less control parameters. *Journal of Building Engineering*, 2020, vol. 32, pp. 101505. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101505>

Авторы

Мозохин Андрей Евгеньевич — кандидат технических наук, ведущий инженер, Группа компаний «СИГМА», Москва, 119048, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-4673-8425>, mozokhin@mail.ru

Шведенко Владимир Николаевич — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук, Москва, 125190, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-3223-4982>, vv_shved@mail.ru

Authors

Andrey E. Mozokhin — PhD, Leading Engineer, SIGMA Group of Companies, Moscow, 119048, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4673-8425>, mozokhin@mail.ru

Vladimir N. Shvedenko — D.Sc., Professor, Leading Researcher, Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI RAS), Moscow, 125190, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3223-4982>, vv_shved@mail.ru