

Обзорная статья

УДК 338.4:621.31

EDN: SNZFCN

DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-773-789

ЭНЕРГЕТИКА



Обзор методов моделирования и управления киберфизическими системами в мультиэнергетических микросетях

Н.В. Томин¹, А.В. Домышев², Е.А. Барахтенко³, В.А. Шакиров⁴, А.Н. Козлов⁵,
И.К. Сосновский^{6✉}, Фанг Лю⁷, Д.Н. Сидоров⁸

^{1-6,8}Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

⁷Центральный южный университет, г. Чанша, Китай

Резюме. Цель – провести анализ развития методов моделирования и управления мультиэнергетическими микросетями с позиции использования киберфизических систем. Для проведения исследования были использованы методы литературного обзора и мета-анализа в области моделирования и управления киберфизическими системами в мультиэнергетических микросетях на основе опубликованных статей, входящих в международные базы данных Scopus, Web of Science, Elibrary, IEEE Xplore и других источников информации. Проведенный анализ показывает, что текущее развитие киберфизических систем идет по пути внедрения концепции интеллектуальных электрических сетей. В данном исследовании резюмируется, что интерфейсы управления, каналы передачи данных и удаленные порты отладки являются уязвимыми частями устройств интернета вещей IoT, которые могут быть потенциально атакованы злоумышленниками. Проведенный анализ опубликованных работ в последние годы в рассматриваемом направлении указывает на то, что мультиагентные технологии представляются эффективным подходом не только для оперативного управления режимами мультиэнергетической микросети, но и для построения ее надежной информационной сети на уровне систем среднего и низкого напряжений. Обзор информационных технологий в области систем распределенной энергетики показывает, что чем больше добавляется возможностей по приему и обработке различного рода информации (данные по транзакциям, параметры режима, статус контролеров и т.п.) из внешних источников, тем более уязвима мультиэнергетическая микросеть к киберугрозам. Для эффективного решения задачи распределения нагрузки между различными энергоисточниками с минимизацией затрат необходимо использовать современные математические методы, такие как искусственный интеллект, динамическая оптимизация и мультиагентные подходы.

Ключевые слова: киберфизическая система, мультиэнергетические микросети, моделирование и управление

Финансирование: Исследование выполнено в рамках гранта Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2022-1215) с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (проект № 13. ЦКП. 21.0038).

Для цитирования: Томин Н.В., Домышев А.В., Барахтенко Е.А., Шакиров В.А., Козлов А.Н., Сосновский И.К., Лю Фанг, Сидоров Д.Н. Обзор методов моделирования и управления киберфизическими системами в мультиэнергетических микросетях // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 773–789. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-773-789>. EDN: SNZFCN.

POWER ENGINEERING

Review article

Review of methods for modeling and control of cyber-physical systems in multi-energy microgrids

Nikita V. Tomin¹, Alexander V. Domyshev², Evgeniy A. Barakhtenko³,
Vladislav A. Shakirov⁴, Alexander N. Kozlov⁵, Ilya K. Sosnovsky^{6✉}, Fang Liu⁷,
Denis N. Sidorov⁸

^{1-6,8}Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

⁷Central South University, Changsha, China

Abstract. The article analyzes the development of methods for modeling and control of multi-energy microgrids through cyber-physical systems. We used the methods of literature review and meta-analysis based on publications from

international databases Scopus and Web of Science, Russian database eLibrary, digital platform IEEEExplore et al. According to the analysis, Smart Grid implementation drives the development of cyber-physical systems. As summarized in this study, control interfaces, data transmission channels, and remote debugging ports are vulnerable parts of IoT devices that can possibly be attacked by intruders. A review of the recent publications in this field finds multi-agent technologies to be an effective approach not only for the operational control of multi-energy microgrid modes, but also for the construction of its reliable information network at the level of medium and low voltage systems. In the field of distributed energy systems, literature review of information technology indicates that the more capabilities are added to receive and process various kinds of information (transaction data, mode parameters, status of controllers, etc.) from external sources, the more vulnerable a multi-energy microgrid is to any cyber threats. Modern mathematical methods such as artificial intelligence, dynamic optimization, and multi-agent approaches should be used to effectively solve the problem of load distribution between different energy sources with cost minimization.

Keywords: cyber-physical system, multi-energy microgrids, modeling and control

Funding: The study is funded by the grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 075-15-2022-1215) using the resources of the High Temperature Contour Resource Sharing Centre (project No. 13.RSC.21.0038).

For citation: Tomin N.V., Domyshev A.V., Barakhtenko E.A., Shakirov V.A., Kozlov A.N., Sosnovskiy I.K., Liu Fang, Sidorov D.N. Review of methods for modeling and control of cyber-physical systems in multi-energy microgrids. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):773-789. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-773-789>. EDN: SNZFCH.

Список сокращений

ВИЭ – возобновляемые источники энергии
ЭЭС – электроэнергетическая система
МЭМС – мультиэнергетическая микросеть
ВЭУ – ветроэлектрические установки
СЭС – солнечные электростанции
ТЭЦ – комбинированные тепло- и электростанции
АКБ – аккумуляторные батареи
ВЭН – водородные накопители энергии

ТЭН – тепловые накопители энергии
СН – система накопителей
ФЭП – фотоэлектрические преобразователи
V2G – vehicle-to-grid
P2G – power-to-grid
FACTS – Flexible AC transmission system
IoT – Internet of Things
WSN – wireless sensor networks

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих странах развивается концепция интеллектуальных («умных») электрических сетей (Smart Grids) [1, 2]. Развитие умных электрических сетей основано на применении современных технологий и компьютерных систем управления для более точного контроля и управления производством, распределением и потреблением электроэнергии. Они объединяют в себе различные силовые элементы энергетической системы, такие как электростанции, подстанции, счетчики и домашние энергетические системы, с целью обеспечения более гибкого и эффективного функционирования сети. Благодаря современным информационно-коммуникационным технологиям управление ЭЭС становится более автоматизированным и гибким.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ЭНЕРГОСИСТЕМ И НЕОБХОДИМОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И МУЛЬТИЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Комплексные вычислительные алгоритмы и машинное обучение позволяют оптимизировать работу электрической сети, предсказывать изменения потребления и принимать соответствующие решения. Регулирующие устройства

позволяют потребителям активно управлять своим электропотреблением, что может способствовать снижению нагрузки на сеть в пиковые часы.

Также разработка интеллектуальных сетей учитывает использование возобновляемой и малой распределенной генерации. Это позволяет не только увеличить долю возобновляемых источников энергии, но и более эффективно.

В результате развитие умных сетей может привести к более эффективному использованию электроэнергии, снижению нагрузки на сеть, более точному и предсказуемому управлению системой, а также интеграции возобновляемых источников энергии.

Развитие данной концепции и поиск новых энергоресурсов мотивировано такими проблемами, как нехватка традиционных энергоресурсов, глобальная озабоченность изменением климата и энергетический кризис, связанный с глобальным экономическим развитием и производством [3, 4]. Выработка электроэнергии и снабжение различных нагрузок с помощью локально доступных возобновляемых источников энергии привели к появлению новой концепции под названием микросеть [5]. Внедрение новых распределенных энергетических ресурсов с различными

системами выработки и хранения возобновляемой энергии в микросетях повлияло на значительные изменения в традиционных энергетических системах [6].

Микросети, как правило, работают не независимо, а соединены с энергосистемой на уровне распределительной сети. Работа микросети совместно с энергосистемой позволяет даже в случае достаточности локальных энергоресурсов обеспечить оптимальность работы, как на локальном уровне, так и использовать ресурс микросети для оптимального управления на уровне энергосистемы [7, 8]. При этом бурное развитие технологий микросетей требует значительных усилий для решения многочисленных экономических, коммерческих и технических проблем. В [9] показано, что микросети могут существенно повысить надежность и экономичность энергоснабжения конечных потребителей, а системы управления энергопотреблением микросетей являются критическими компонентами, которые могут помочь микросетям реализоваться.

Мультиэнергетическая микросеть (МЭМС) в общем виде обычно объединяет как различные распределенные источники электро-, тепло-, холодо- и газоснабжения (рис. 1), такие как ветроэлектрические установки (ВЭУ), солнечные электростанции (СЭС), микротурбины, комбинированные тепло- и электростанции (ТЭЦ), аккумуляторные накопители энергии, тепловые накопители энергии (ТЭН) и водородные накопители энергии (ВЭН) [10], так и ряд технологий преобразования энергии: двуна-

правленной зарядки (V2G), преобразования электроэнергии в газ (P2G) и т.п. В тоже время современные МЭМС – это киберфизические системы с внедрением передовых информационных и коммуникационных технологий для широкомасштабной многосторонней координации [11]. При объединении нескольких территориально близких МЭМС могут возникать более сложные информационно-энергетические структуры – энергетические сообщества, когда отдельные потребители имеют возможность обмениваться излишками энергии, производимой в том числе с использованием возобновляемых источников (ВИЭ) [12]. В связи с этим для эффективной работы МЭМС с использованием ВИЭ необходимо разработать новые методы управления, которые учитывают нестабильность генерации энергии. Одним из таких методов является управление с учетом прогноза погодных условий, которое позволяет адаптировать работу МЭМС в зависимости от ожидаемых изменений в генерации ВИЭ.

Также для обеспечения устойчивой работы МЭМС с большой долей ВИЭ можно использовать энергетические хранилища, такие как аккумуляторы или системы хранения водорода. Эти устройства позволяют сохранять излишки энергии, производимой ВИЭ, и использовать ее в периоды недостатка генерации.

Для оптимизации работы МЭМС с большой долей ВИЭ также могут применяться алго-

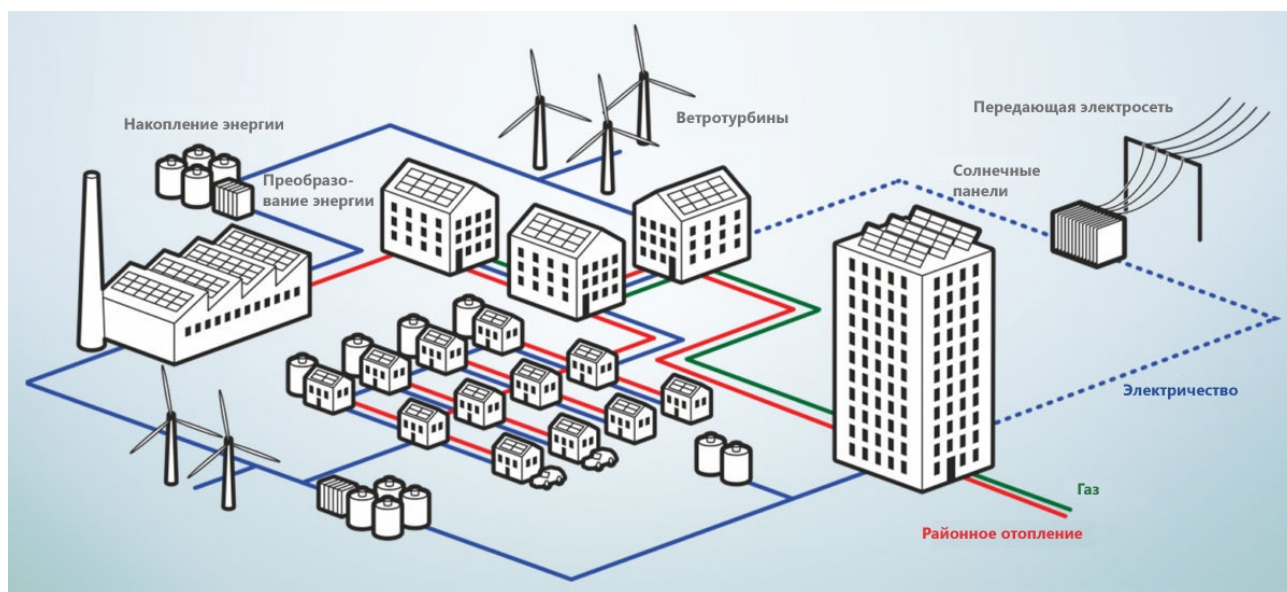


Рис. 1. Общая структура типичной мультиэнергетической микросети
Fig. 1. General structure of a typical multi-energy microgrid

ритмы прогнозирования спроса на энергию и управления с применением искусственного интеллекта. Эти алгоритмы позволяют прогнозировать пиковые нагрузки энергии и распределять ресурсы МЭМС в зависимости от предполагаемого спроса.

Таким образом, управление МЭМС с большой долей ВИЭ требует разработки специализированных методов, которые учитывают нестабильность генерации энергии. Эти методы позволяют обеспечить устойчивую работу МЭМС и максимально эффективное использование ВИЭ [13].

Стоит отметить, что на сегодняшний день существенную стохастическую составляющую в поведение МЭМС и всей электрической сети вносят электромобили.

Подключение электромобилей к электрической сети может вносить дополнительные риски и вызывать проблемы с нагрузкой на сеть, особенно если зарядка происходит нескоординированно и на высокой мощности. Этот эффект может быть усилен в МЭМС, т.к. их мощность обычно невелика, а внезапный и значительный прирост потребления электроэнергии может вызывать локальные проблемы с режимами сети.

Множеством исследований в области влияния зарядки электромобилей на электрические сети, включая МЭМС, рассматриваются модели процесса зарядки электромобилей в определенных местах сети – детерминированный подход [14–18]. Это позволяет анализировать потенциальные риски и проблемы на местах с высокой концентрацией зарядных станций и предоставляет рекомендации по оптимизации процесса зарядки и управлению нагрузкой.

Кроме того, оптимизация мест установки зарядных станций также является важным аспектом, поскольку правильное размещение зарядных инфраструктур может сократить нагрузку на электропередачу и предотвратить возможные проблемы с неравномерным распределением нагрузки. Исследования по оптимальному размещению зарядных станций помогают определить области с наибольшим спросом на зарядки и спрогнозировать необходимость инфраструктуры в этих местах.

В целом детерминированный подход, моделирование процесса зарядки и оптимизация размещения зарядных станций важны для анализа и управления влиянием электромобилей на электрические сети, включая МЭМС. Они помогают предотвратить нагрузочные

ситуации и эффективно интегрировать электромобили в энергетическую систему [19, 20].

Важным вопросом для управления режимами электроэнергетических систем являются вероятностные модели определения загрузки электрических сетей с учетом влияния зарядных станций электромобилей [21–23]. Недавно технология Vehicle To Grid (V2G), которая позволяет электромобилям выдавать электроэнергию в сеть, стала предметом увеличенного интереса. Она позволяет компенсировать негативное влияние электрического транспорта на работу электрической сети и увеличивает гибкость системы. Работы по V2G касаются алгоритмов оптимизации и управления зарядкой электротранспорта, стимулирующих пользователей отдавать энергию в сеть, когда это необходимо [24–27].

СОВРЕМЕННЫЕ ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ МУЛЬТИЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ

По теме управления МЭМС к настоящему времени опубликовано множество научных работ, например, высокого качества обзорные статьи [28–36]. Несмотря на разнообразие предлагаемых решений, задачи управления МЭМС можно обобщить до следующих:

- управление распределенной генерацией и активной нагрузкой по экономическим критериям;
- оптимальное управление нормальными режимами МЭМС;
- обеспечение устойчивости МЭМС;
- планирование развития и ремонтов МЭМС с учетом энергетической гибкости и надежности.

Первые две из представленных задач достаточно близки и касаются управления нормальными режимами мультиэнергетической сети. В первом случае задача заключается в получении оптимального графика использования источников энергии для удовлетворения ожидаемого спроса на энергию. При ее решении необходимо учитывать системные условия и ограничения, затраты, а также ограничения генерирующего оборудования. Для МЭМС это относится к оптимальному использованию каждого энергетического блока с целью удовлетворения спроса на различные виды энергии с минимизацией общих эксплуатационных затрат. Вторая задача в основном выполняется за счет управляющих воздействий в самой сети (как микросети, так

и питающей распределительной сети). Этими воздействиями могут быть: изменения коэффициентов трансформации, топологическое переконфигурирование сети коммутационными аппаратами, изменение проводимостей компенсирующих устройств, воздействия устройствами FACTS. Другими словами, эту задачу можно рассматривать как задачу определения оптимального потокораспределения, которая состоит в распределении нагрузки между источниками энергии с целью минимизации затрат на ее производство или потерь мощности в сети, учитывая ограничения системы транспорта энергии. При этом необходимо принимать во внимание потребность в различных видах энергии, которая может удовлетворяться путем использования различных энергоисточников и устройств преобразования энергии с учетом сетевых ограничений для каждого вида энергоносителя.

Управление МЭМС связано с необходимостью обеспечения устойчивого энергоснабжения потребителей и своевременного удовлетворения спроса на различные виды энергии. Оптимальная стратегия управления МЭМС позволяет обеспечить эффективное снабжение энергией потребителей. Можно выделить два следующих подхода к организации управления МЭМС (рис. 2):

– централизованная структура управления;

– распределенная структура управления.

В [36] авторами предлагается подход, обеспечивающий иерархическое централизованное управление МЭМС. В этом подходе контроллер одновременно управляет системами тепло-, газо- и электроснабжения. Учет динамических характеристик различных систем выполняется в соответствии с тремя уровнями: медленный, средний и быстрый. При этом реализуется координированное управление различными системами энергоснабжения, в том числе в ситуациях, когда в энергосистеме происходят изменения ее состояний, связанные с изменениями режимов работы, колебаниями выработки энергии от ВИЭ, пусками различного оборудования (например, кондиционеры и микротурбины), реакцией на текущий спрос, а также с аккумулярованием электро- и теплоэнергии. Результаты этого исследования получили развитие для управления городской МЭМС [38]. Подобный подход применяется к решению задачи планирования режимов [39], где оптимизация выполняется для временного периода, равного суткам. При этом стратегия управления в режиме реального времени компенсирует несоответствие между запланированной и реальной нагрузкой путем реализации требуемых управляющих воздействий в МЭМС.

Централизованная структура управления может обеспечить эффективность функцио-

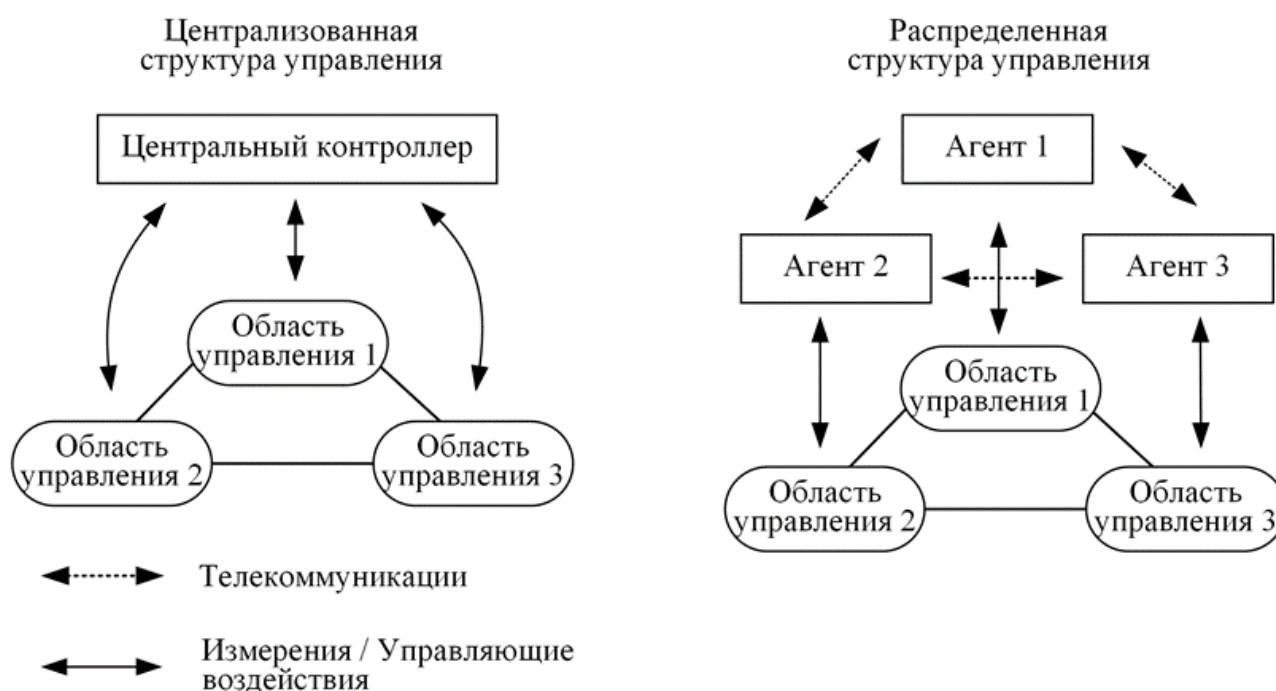


Рис. 2. Подходы к организации управления мультиэнергетической микросети [37]
Fig. 2. Approaches to multi-energy microgrid management organization [37]

нирования энергетической системы, однако имеющаяся сложность ограничивает ее широкое практическое применение. В случае распределенных структур управления общая сложная задача управления делится на ряд более простых подзадач. При этом необходимо выполнить локальное управляющее воздействие, которое зависит от действий окружающих контроллеров и должно реализовываться согласованно. Например, в работе [40] предложена математическая модель для распределенного управления МЭМС. В монографии [41] дана схема для реализации распределенного управления энергохабами, которые моделируют МЭМС. Эта схема учитывает динамику, связанную с работой энергоаккумуляторов. В работе [42] представлен подход к управлению МЭМС, включающих такие энергоносители, как электроэнергия (переменного или постоянного тока), тепловая энергия, водород и природный газ на основе распределенной структуры управления. Этот подход обеспечивает минимизацию общих затрат и/или объема выбросов вредных веществ при соблюдении ограничений в сети и ограничений, связанных с рыночными контрактами.

В ряде научных исследований авторы успешно применяют мультиагентный подход для решения задачи управления функционированием энергетических систем. В статье [43] предлагается архитектура системы управления микросетями, основанная на мультиагентном подходе. Эта архитектура ориентирована на конечного пользователя и обеспечивает мониторинг, управление и контроль энергоресурсов. Предлагаемая архитектура позволяет синтезировать показания датчиков для организации учета и эффективной оптимизации ресурсов. Создаваемая информационно-технологическая архитектура платформы получила название μ GIM, от «microgrid intelligent management». В работе [44] авторы применяют мультиагентную систему управления энергопотреблением для решения задач мониторинга и оптимального управления мультиэнергетическими системами зданий и микросетями с разнотипными ВИЭ и подключенными к ним контролируемыми нагрузками потребителей. В работе [45] для обмена энергией и создания комфортных условий в умном здании представлена иерархическая мультиагентная система управления. Технология иерархической мультиагентной системы при-

меняется для управления инфраструктурным комплексом интеллектуального здания. Для оптимизации режимов функционирования всей системы и интеллектуального поиска решения при управлении интегрированными комплексами зданий и микросетей применяется метод роя частиц. В исследовании, излагаемом в [46], предлагается модель мультиагентной системы, используемая для оптимального управления микросетями, интегрированными с ВИЭ. Производство электроэнергии распределенной генерацией, работающей на разных видах энергоресурсов, имеет нагрузки различной категоричности и предпочтительности их покрытия от собственного источника и/или поставок из централизованной системы. В статье [47] авторы предлагают концепцию оптимального управления температурой в помещении на основе агентного подхода. Предложенная концепция управления учитывает различные требования к параметрам отопления и охлаждения. В работе [48] авторы применяют агентный подход для оптимизации надежности ЭЭС в процессе ее восстановления. В статье [49] авторы применяют мультиагентный подход для рационального распределения нагрузки между централизованными и распределенными источниками энергии в мультиэнергетической энергосистеме. Представленные публикации показывают, что мультиагентный подход является актуальным, востребованным методом и успешно применяется для решения различных проблем, возникающих как в энергетике, так и в других областях науки.

Системы управления энергетическими данными, как правило, состоят из пяти ключевых компонентов:

- устройства измерения;
- система сбора данных;
- коммуникационная система;
- система хранения данных;
- система анализа данных.

Система сбора данных включает оборудование и протоколы, используемые для передачи данных с устройств измерения в систему сбора данных. Через определенные промежутки времени система сбора данных передает данные через коммуникационную систему в систему хранения данных, где полученные данные обрабатываются и хранятся. Затем система «анализ данных» обрабатывает данные для решения следующих задач: извлечение значимой информации из полу-

ченных данных; проведение аналитических расчетов по запросу; отображение результатов в удобных для пользователя форматах.

Коммуникационные ресурсы, реализуемые в МЭМС, также включают в себя набор физических (контроллеры, датчики, сенсоры и пр.) и информационных инструментов (одноранговые сети, облачные ресурсы, интернет энергии и пр.), позволяющие операторам МЭМС и конечным потребителям реализовывать эффективное взаимодействие и управление [12, 50]. В дополнение к сбору данных со всех компонентов генерации, хранения, потребления и связи между операторами МЭМС требуются каналы связи для обмена важной информацией о границах их глобальной координации. Стремительное распространение передовых интеллектуальных счетчиков и коммуникационных технологий открывает широкие возможности для проактивных программ управления спросом конечных потребителей, которые возлагают огромные вычислительные и коммуникационные нагрузки на энергоемкие устройства связи [12, 50, 51]. Учитывая такую ключевую роль коммуникационной инфраструктуры в работе МЭМС, необходимо совместно оптимизировать энергетические и информационные ресурсы МЭМС. Описываемые тенденции показывают увеличение сложности МЭМС и как следствие необходимость более оперативного управления режимами таких систем энергосистем, а в идеале автоматического оптимального управления.

В работе [52] дано описание информационной системы для управления гибридными микросетями, построенной на основе агентных технологий. Представлено решение задачи эффективного управления потоками данных в распределенных гибридных энергосетях. В работе [53] приведено описание потоков данных и требования к ним при решении задач управления зданием или совокупностью зданий в интеллектуальной сети.

Внешние источники обмена информацией для МЭМС и энергетических сообществ включают устройства, подключенные к интернету вещей (IoT) (интеллектуальные устройства, которые обеспечивают доступ к данным/управлению через Интернет), сигналы регулирования частоты и т.д. Чем больше добавляется возможностей по приему и обработке различного рода информации из внешних источников, тем более уязвима

МЭМС к киберугрозам. Это связано с тем, что интеллектуальные счетчики и другие передовые коммуникационные технологии становятся уязвимыми для атак; если уязвимые части, такие как интерфейсы управления, каналы передачи данных и удаленные порты отладки, не защищены должным образом. Устройства IoT, подключенные к общедоступной сети и сети электрических систем одновременно, могут быть и каналами, через которые могут быть выполнены кибератаки [54, 55]. Благодаря быстрому развитию телекоммуникационных систем IoT может взаимодействовать с беспроводными сенсорными сетями (WSN), радиочастотной идентификацией (RFID, микросетями в любой форме, в любое время и в любом месте. Кибербезопасность – это неизбежная проблема, которую необходимо решить при развитии IoT. Если проблема не решается должным образом, злоумышленники воспользуются дефектами и слабостями устройств или объектов, а затем исказят данные или нарушат работу систем через глобальную сеть IoT. Новые методики и технологии должны быть разработаны для удовлетворения требований безопасности, конфиденциальности и надежности IoT [56, 57].

В [58] показано, что из-за уязвимости киберсистем любые киберинциденты могут иметь экономические и технологические последствия для их функционирования. В МЭМС, интенсивно использующих силовую электронику, кибератаки могут иметь гораздо более вредные и разрушительные последствия. Кроме этого, кибератаки могут вызвать значительные экономические проблемы в интеллектуальных микросетях [59, 60], особенно в режиме подключения к сети с ВИЭ. Большинство нерегулируемых рынков электроэнергии состоят из рынка на сутки вперед и рынка в режиме реального времени [61, 62]. Поскольку кибератаки внедрения ложных данных могут повлиять на прогнозирование нагрузки, рынок «на сутки вперед» уязвим для таких атак. Рынок реального времени использует результаты оценивания состояния для оценки генерируемой мощности и мощности нагрузки в каждом узле, которая используется для расчета потока мощности через каждую линию (например, можно применять оптимальный поток мощности). Таким образом, кибератаки, которые влияют на результаты оценивания состоя-

ния, влияют на рынок в реальном времени [63–68].

Большинство существующих методов распределенного управления МЭМС предложены на основе предположения, что вторичные контроллеры блоков распределенной генерации работают в штатных условиях. Однако сбои и атаки распределенной системы управления могут привести к значительным последствиям и, следовательно, повлиять на безопасность и устойчивость МЭМС. В [69] предложена стратегия распределенного устойчивого управления для нескольких систем накопления энергии в изолированных микросетях для решения проблемы кибербезопасности.

В МЭМС сбои и атаки могут происходить в различных местах вторичной системы управления. В частности, устройства управления и связи, имеющие доступ к сети, уязвимы для кибератак [70, 71]. В [72] разработан прототип инструмента под названием Hunge для получения инвариантов-кандидатов, которые необходимо сравнить с фактическими инвариантами для идентификации атаки с внедрением ложных данных. В [73] распределенный вторичный контроль изолированных микросетей достигается с помощью первично-двойственного алгоритма, и предлагаются основанные на модели стратегии обнаружения и локализации аномалий. Работа [74] исследует скрытую стратегию обнаружения кибератак для микросетей постоянного тока. С другой стороны, для повышения устойчивости системы микросетей в недавних исследованиях [75, 76] предлагается киберустойчивая схема управления. Кроме того, было проведено множество исследований для изучения проблем коммуникационных линий и методов смягчения последствий кибератак для микросетей, таких как коммуникационный шум [77], задержки [78] и потеря пакетов [79]. В связи с этим для оценки воздействия кибератак и выявления наиболее уязвимых объектов ЭЭС в [80] был введен показатель кибербезопасности, под которым понимается уровень защищенности информационной или технологической подсистемы распределенной энергетической сети от кибератак. Кроме того, с целью минимизации последствий кибератак, влияющих на качество информации, используемой при управлении ЭЭС, в [81] проведен анализ киберустойчивости систем сбора, обработки и передачи информации и предложены меры по ее обеспечению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Развитие концепции умных сетей и поиск новых энергоресурсов мотивировано такими проблемами, как нехватка традиционных энергоресурсов, глобальная озабоченность изменением климата и энергетический кризис, связанный с глобальным экономическим развитием и производством.

2. Общие процессы децентрализации, декарбонизации и цифровизации, а также формирование новых энергетических практик, внедрение новых технологий, проникновение ВИЭ и силовой электроники стимулируют все большее развитие микросетей и их трансформацию в МЭМС как автономных и самостоятельных энергетических структур. При этом нестабильность генерации ВИЭ, которая активно используется в МЭМС, отрицательно влияет на их устойчивую работу и усложняет прогнозирование и оптимизацию их режимов.

3. Задача определения оптимального потока распределения в МЭМС сводится к задаче распределения нагрузки между различными энергоисточниками с минимизацией затрат (например, на производство энергии, выбросы загрязняющих веществ, потребление энергии из внешней энергосистемы, потери мощности) и учетом различных ограничений. Решение этой задачи требует учитывать потребность в различных видах энергии, которая удовлетворяется путем использования соответствующих энергоисточников и устройств для преобразования энергии с соблюдением ограничений для каждого вида энергоносителя. Эффективное решение такой задачи возможно при использовании продвинутых математических методов на базе искусственного интеллекта, динамической оптимизации, мультиагентных подходов.

4. Анализ последних исследований указывает на то, что мультиагентные технологии представляются эффективным подходом не только для оперативного управления режимами МЭМС, но и для построения ее надежной информационной сети на уровне систем среднего и низкого напряжений. Мультиагентный принцип также позволяет легко реализовать и внедрить технологию IoT, а также принципы так называемой роевой сети (англ. swarm grid) при реализации физических и информационных уровней систем мониторинга и управления МЭМС.

5. Обзор информационных технологий в области систем распределенной энергетики показывает, что чем больше добавляется воз-

возможностей по приему и обработке различного рода информации из внешних источников, тем более уязвима МЭМС к киберугрозам. Это связано с тем, что интеллектуальные счетчики и другие передовые коммуникационные технологии становятся уязвимыми для атак, если уязвимые части, такие как интер-

фейсы управления, каналы передачи данных и удаленные порты отладки, не защищены должным образом. Устройства IoT, подключенные к общедоступной сети и сети электрических систем одновременно, могут быть и каналами, через которые могут быть выполнены кибератаки.

Список источников

1. Bamberger Y., Baptista J., Belmans R., Buchholz B.M., Chebbo M., Del Valle J.L., et al. Vision and strategy for Europe's electricity networks of the future // European technology platform Smart Grids. 2006. P. 4–35.
2. Бухгольц Б.М., Стычински З.А. Smart grids – основы и технологии энергосистем будущего / пер. с англ. Ю.В. Шарова, П.Ю. Коваленко, К.А. Осинцева; под общ. ред. Н.И. Воропая. М.: МЭИ, 2017. 461 с.
3. Zuo Hongyan, Zhang Bin, Huang Zhonghua, Wei Kexiang, Zhu Hong, Tan Jiqui. Effect analysis on SOC values of the power lithium manganese battery during discharging process and its intelligent estimation // Energy. 2022. Vol. 238. Part B. P. 121854. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121854>.
4. Zhao Xiaohuan, E Jiaqiang, Wu Gang, Deng Yuanwang, Han Dandan, Zhang Bin, et al. A review of studies using graphenes in energy conversion, energy storage and heat transfer development // Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 184. P. 581–599. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.092>.
5. Mirzaei M.A., Sadeghi-Yazdankhah A., Mohammadi-Ivatloo B., Marzbani M., Shafie-khah M., Catalão J.P.S. Integration of emerging resources in IGDT-based robust scheduling of combined power and natural gas systems considering flexible ramping products // Energy. 2019. Vol. 189. P. 116195. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116195>.
6. Karimi H., Jadid S. Optimal energy management for multi-microgrid considering demand response programs: a stochastic multi-objective framework // Energy. 2020. Vol. 195. Iss. C. P. 116992. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116992>.
7. Bullich-Massagué E., Díaz-González F., Aragüés-Peñalba M., Girbau-Llistuella F., Olivella-Rosell P., Sumper A. Microgrid clustering architectures // Applied Energy. 2018. Vol. 212. P. 340–361. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.048>.
8. Sadeghi D., Naghshbandy A.H., Bahramara S. Optimal sizing of hybrid renewable energy systems in presence of electric vehicles using multi-objective particle swarm optimization // Energy. 2020. Vol. 209. P. 118471. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118471>.
9. Su Wencong, Wang Jianhui. Energy management systems in microgrid operations // The Electricity Journal. 2012. Vol. 25. Iss. 8. P. 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.010>.
10. Khan M.W., Wang Jie, Xiong Linyun. Optimal energy scheduling strategy for multi-energy generation grid using multi-agent systems // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2021. Vol. 124. P. 106400. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106400>.
11. Xu Da, Zhou Bin, Liu Nian, Wu Qiuwei, Voropai N., Li Canbing, et al. Peer-to-peer multienergy and communication resource trading for interconnected microgrids // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2021. Vol. 17. Iss. 4. P. 2522–2533. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3000906>.
12. Tomin N., Shakirov, V. Kurbatsky V., Muzychuk R., Popova E., Sidorov D., et al. A multi-criteria approach to designing and managing a renewable energy community // Renewable Energy. 2022. Vol. 199. P. 1153–1175. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.151>.
13. Стычински З.А., Воропай Н.И. Возобновляемые источники энергии: теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика. Magdeburg: Магдебургский университет имени Отто-фон-Герике, 2010. 209 с.
14. Fernandez L.P., Roman T.G.S., Cossent R., Domingo C.M., Frías P. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks // IEEE transactions on power systems. 2011. Vol. 26. Iss. 1. P. 206–213. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2049133>.
15. Valsera-Naranjo E., Martinez-Vicente D., Sumper A., Villafila-Robles R. Deterministic and probabilistic assessment of the impact of the electrical vehicles on the power grid // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039546>.
16. Papadopoulos P., Skarvelis-Kazakos S., Unda I.G., Cipcigan L. Electric vehicles' impact on British distribution networks // IET Electrical Systems in Transportation. 2012. Vol. 2. Iss. 3. P. 91–102. <https://doi.org/10.1049/iet-est.2011.0023>.
17. Vlachogiannis J.G. Probabilistic constrained load flow considering integration of wind power generation and electric vehicles // IEEE Transactions on Power Systems. 2009. Vol. 24. Iss. 4. P. 1808–1817.
18. Duan Min, Darvishan A., Mohammaditab R., Wakil K., Abedinia O. A novel hybrid prediction model for aggregated loads of buildings by considering the electric vehicles // Sustainable Cities and Society. 2018. Vol. 41. C. 205–219. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.009>.
19. Faridimehr S., Venkatachalam S., Chinnam R.B. A stochastic programming approach for electric vehicle charging network design // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2018. Vol. 20. Iss. 5. P. 1870–1882. <https://doi.org/10.1109/ITS.2018.2822222>.

org/10.1109/TITS.2018.2841391.

20. Morshed M.J., Hmida J.B., Fekih A. A probabilistic multi-objective approach for power flow optimization in hybrid wind-PV-PEV systems // *Applied Energy*. 2018. Vol. 211. P. 1136–1149. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.101>.
21. Zhao L., Prousch S., Hübner M., Moser A. Simulation methods for assessing electric vehicle impact on distribution grids // *IEEE PES T&D* 2010. 2010. <https://doi.org/10.1109/TDC.2010.5484386>.
22. Lopes J.A.P., Soares F.J., Almeida P.M.R. Integration of electric vehicles in the electric power system // *Proceedings of the IEEE*. 2011. Vol. 99. Iss. 1. C. 168–183. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2066250>.
23. Almoghaty Ya., Barker K. Component importance measures for interdependent infrastructure network resilience // *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 133. P. 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.05.001>.
24. Hu Junjie, Morais Hugo, Sousa Tiago, Lind Morten. Electric vehicle fleet management in smart grids: a review of services, optimization and control aspects // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 56. P. 1207–1226. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.014>.
25. Mwasilu F., Justo J.J., Kim Eun-Kyung, Do Ton Duc. Electric vehicles and smart grid interaction: a review on vehicle to grid and renewable energy sources integration // *Renewable and sustainable energy reviews*. 2014. Vol. 34. P. 501–516. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.031>.
26. Tan Kang Miao, Ramachandramurthy V.K., Yong Jia Ying. Integration of electric vehicles in smart grid: a review on vehicle to grid technologies and optimization techniques // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 53. P. 720–732. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.012>.
27. Sortomme E., El-Sharkawi M.A. Optimal scheduling of vehicle-to-grid energy and ancillary services // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012. Vol. 3. Iss. 1. P. 351–359.
28. Xu Xiandong, Jia Hongjie, Wang Dan, Yu David C., Chiang Hsiao-Dong. Hierarchical energy management system for multi-source multi-product microgrids // *Renewable Energy*. 2015. Vol. 78. P. 621–630. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.039>.
29. Xu Xiandong, Jin Xiaolong, Jia Hongjie, Yu Xiaodan, Li Kang. Hierarchical management for integrated community energy systems // *Applied Energy*. 2015. Vol. 160. P. 231–243. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.134>.
30. Ramírez-Elizondo L.M., Paap G.C. Scheduling and control framework for distribution level systems containing multiple energy carrier systems: Theoretical approach and illustrative example // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2015. Vol. 66. P. 194–215. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.10.045>.
31. Liu Jinglu, Wang Anna, Wang Xingyu, Tao Ran. Coupled distributed control scheme for multi-energy systems with transmission losses based on event-triggered communication // *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2020. Vol. 12. P. 055302. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/5.0024714>.
32. Arnold M., Negenborn R.R., Andersson G., De Schutter B. Distributed predictive control for energy hub coordination in coupled electricity and gas networks // *Intelligent Infrastructures*. Dordrecht: Springer, 2010. Vol. 42. P. 235–273. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3598-1_10.
33. Skarvelis-Kazakos S., Papadopoulos P., Unda I.G., Gorman T., Belaidi A., Zigan S. Multiple energy carrier optimisation with intelligent agents // *Applied Energy*. 2016. Vol. 167. P. 323–335. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.130>.
34. Gomes L., Vale Z., Corchado J.M. Microgrid management system based on a multi-agent approach: an office building pilot // *Measurement*. 2020. Vol. 154. 107427. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107427>.
35. Anvari-Moghaddam A., Rahimi-Kian A., Mirian M.S., Guerrero J.M. A multi-agent based energy management solution for integrated buildings and microgrid system // *Applied Energy*. 2017. Vol. 203. P. 41–56. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.007>.
36. Wang Lingfeng, Wang Zhu, Yang Rui. Intelligent multiagent control system for energy and comfort management in smart and sustainable buildings // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012. Vol. 3. Iss. 2. P. 605–617. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2178044>.
37. Poulin C., Kane M.B. Infrastructure resilience curves: performance measures and summary metrics // *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. Vol. 216. P. 107926. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107926>.
38. Khan M.W., Wang Jie, Xiong Linyun, Ma Meiling. Modelling and optimal management of distributed microgrid using multiagent systems // *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 41. P. 154–169. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.018>.
39. Bünning F., Wetter M., Fuchs M., Müller D. Bidirectional low temperature district energy systems with agent-based control: Performance comparison and operation optimization // *Applied Energy*. 2018. Vol. 209. P. 502–515. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.072>.
40. Ren Yi, Fan Dongming, Feng Qiang, Wang Zili, Sun Bo, Yang Dezhen. Agent-based restoration approach for reliability with load balancing on smart grids // *Applied Energy*. 2019. Vol. 249. P. 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.119>.
41. Ahčin P., Šikić M. Simulating demand response and energy storage in energy distribution systems // *International Conference on Power System Technology*. 2010. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2010.5666564>.
42. Sharma P., Mathur H.D., Mishra P., Bansal R.C. A critical and comparative review of energy management strategies for microgrids // *Applied Energy*. 2022. Vol. 327. P. 120028. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120028>.
43. Salehi N., Martínez-García H., Velasco-Quesada G., Guerrero J.M. A comprehensive review of control strategies and

- optimization methods for individual and community microgrids // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 15935–15955. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3142810>.
44. Shulyma O., Davidsson P., Shendryk V., Marchenko A. The architecture of an information system for the management of hybrid energy grids // Position Papers of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems. 2015. Vol. 6. P. 281–288. <https://doi.org/10.15439/2015F402>.
45. Lawrence T.M., Watson R.T., Boudreau M.-C., Mohammadpour J. Data flow requirements for integrating smart buildings and a smart grid through model predictive control // Procedia Engineering. 2017. Vol. 180. P. 1402–1412. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.303>.
46. Zia M.F., Elbouchikhi E., Benbouzid M. Microgrids energy management systems: a critical review on methods, solutions, and prospects // Applied Energy. 2018. Vol. 222. P. 1033–1055. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.103>.
47. Fontenot H., Dong Bing. Modeling and control of building-integrated microgrids for optimal energy management – a review // Applied Energy. 2019. Vol. 254. P. 113689. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113689>.
48. Qahmash A., Algarni A., Hussain M.R. A comprehensive review on integration challenges, optimization techniques and control strategies of hybrid AC/DC Microgrid // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 14. P. 6242. <https://doi.org/10.3390/app11146242>.
49. Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G., Sokolov D., Zhou Bin. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach // Applied Energy. 2022. Vol. 309. P. 118487. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118487>.
50. Bhargavi K.M., Jayalakshmi N.S., Gaonkar D.N., Ashish S. A comprehensive review on control techniques for power management of isolated DC microgrid system operation // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 32196–32228. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060504>.
51. Panaparambil V.S., Kashyap Y., Castelino R.V. A review on hybrid source energy management strategies for electric vehicle // International Journal of Energy Research. 2021. Vol. 45. Iss. 14. P. 19819–19850. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/er.7107>.
52. Ma Guolong, Li Jianing, Zhang Xiao-Ping. A review on optimal energy management of multimicrogrid system considering uncertainties // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 77081–77098. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3192638>.
53. Yu Rong, Ding Jiefei, Maharjan S., Gjessing S., Zhang Yan, Tsang Danny H.K. Decentralized and optimal resource cooperation in geo-distributed mobile cloud computing // IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing. 2018. Vol. 6. Iss. 1. P. 72–84. <https://doi.org/10.1109/TETC.2015.2479093>.
54. Ahvar E., Orgerie A.-C., L  bre A. Estimating energy consumption of cloud, fog and edge computing infrastructures // IEEE Transactions on Sustainable Computing. 2019. Vol. 7. Iss. 2. P. 277–288. <https://doi.org/10.1109/TSUSC.2019.2905900>.
55. Mishra S., Anderson K., Miller B., Boyer K., Warren A. Microgrid resilience: a holistic approach for assessing threats, identifying vulnerabilities, and designing corresponding mitigation strategies // Applied Energy. 2020. Vol. 264. P. 114726. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114726>.
56. Lu Yang, Xu Li Da. Internet of things (IoT) cybersecurity research: a review of current research topics // IEEE Internet of Things Journal. 2019. Vol. 6. Iss. 2. P. 2103–2115. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2869847>.
57. Atzori L., Iera A., Morabito G. The internet of things: a survey // Computer Networks. 2010. Vol. 54. Iss. 15. P. 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.
58. Roman R., Zhou Jianying, Lopez J. On the features and challenges of security and privacy in distributed internet of things // Computer Networks. 2013. Vol. 57. Iss. 10. P. 2266–2279. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2012.12.018>.
59. Nejabatkhah F., Li Yun Wei, Liang Hao, Ahrabi R.R. Cyber-security of smart microgrids: a survey // Energies. 2020. Vol. 14. Iss. 1. P. 27. <https://doi.org/10.3390/en14010027>.
60. Zhao Chengcheng, He Jianping, Cheng Peng, Chen Jiming. Analysis of consensus-based distributed economic dispatch under stealthy attacks // Transactions on Industrial Electronics. 2017. Vol. 64. Iss. 6. P. 5107–5117. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2638400>.
61. Li Peikai, Liu Yun, Xin Huanhai, Jiang Xichen. A robust distributed economic dispatch strategy of virtual power plant under cyber-attacks // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2018. Vol. 14. Iss. 10. P. 4343–4352. <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2788868>.
62. Kosut O., Jia Liyan, Thomas R.J., Tong Lang. Malicious data attacks on the smart grid // IEEE Transactions on Smart Grid. 2011. Vol. 2. Iss. 4. P. 645–658. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2163807>.
63. Xie Le, Mo Yilin, Sinopoli Bruno. Integrity data attacks in power market operations // IEEE Transactions on Smart Grid. 2011. Vol. 2. Iss. 4. P. 659–666. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2161892>.
64. Estay D.A.S., Sahay R., Barfod M.B., Jensen C.D. A systematic review of cyber-resilience assessment frameworks // Computers & Security. 2020. Vol. 97. P. 101996. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2020.101996>.
65. Tang Sirui, Liu Zhaoxi, Wang Lingfeng. Power system reliability analysis considering external and insider attacks on the SCADA system // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. 2020. <https://doi.org/10.1109/TD39804.2020.9299922>.
66. Chen Bo, Wang Jianhui, Shahidehpour M. Cyber-physical perspective on smart grid design and operation // IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications. 2018. Vol. 3. P. 129–141. <https://doi.org/10.1049/iet-cps.2017.0143>.

67. Xie Le, Mo Yilin, Sinopoli B. False data injection attacks in electricity markets // First IEEE International Conference on Smart Grid Communications. 2010. <https://doi.org/10.1109/SMARTGRID.2010.5622048>.
68. Jia Liyan, Thomas R.J., Tong Lang. Impacts of malicious data on real-time price of electricity market operations // Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences (Maui, HI, 4–7 January 2012). Maui, HI: IEEE, P. 1907–1914. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2012.313>.
69. Deng Chao, Wang Yu, Wen Changyun, Xu Yan, Lin Pengfeng. Distributed resilient control for energy storage systems in cyber–physical microgrids // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2021. Vol. 17. Iss. 2. P. 1331–1341. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2981549>.
70. Sahoo S., Dragičević T., Blaabjerg F. Cyber security in control of grid-tied power electronic converters—challenges and vulnerabilities // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2019. Vol. 9. Iss. 5. P. 5326–5340. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2953480>.
71. Beg O.A., Johnson T.T., Davoudi A. Detection of false-data injection attacks in cyber-physical DC microgrids // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2017. Vol. 13. Iss. 5. P. 2693–2703. <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2656905>.
72. Arghandeh R., Meier A., Mehrmanesh L., Mili L. On the definition of cyber-physical resilience in power systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 58. P. 1060–1069. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.193>.
73. Lu Lin-Yu, Liu Hao Jan, Zhu Hao, Chu Chia-Chi. Intrusion detection in distributed frequency control of isolated microgrids // IEEE Transactions on Smart Grid. 2019. Vol. 10. Iss. 6. P. 6502–6515. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2906573>.
74. Sahoo S., Mishra S., Peng Jimmy Chih-Hsien, Dragicevic T. A stealth cyber-attack detection strategy for DC microgrids // IEEE Transactions on Power Electronics. 2018. Vol. 34. Iss. 8. P. 8162–8174. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2879886>.
75. Abhinav S., Modares H., Lewis F.L., Ferrese F., Davoudi A. Synchrony in networked microgrids under attacks // IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. Vol. 9. Iss. 6. P. 6731–6741. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2721382>.
76. Bidram A., Poudel B., Damodaran L., Fierro R., Guerrero J.M. Resilient and cybersecure distributed control of inverter-based islanded microgrids // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2020. Vol. 16. Iss. 6. P. 3881–3894. <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2941748>.
77. Dehkordi N.M., Baghaee H.R., Sadati N., Guerrero J.M. Distributed noise-resilient secondary voltage and frequency control for islanded microgrids // IEEE Transactions on Smart Grid. 2019. Vol. 10. Iss. 4. P. 3780–3790. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2834951>.
78. Ding Lei, Han Qing-Long, Wang Le Yi, Sindi E. Distributed cooperative optimal control of DC microgrids with communication delays // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2018. Vol. 14. Iss. 9. P. 3924–3935. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2799239>.
79. Duan Jie, Chow Mo-Yuen. Robust consensus-based distributed energy management for microgrids with packet losses tolerance // IEEE Transactions on Smart Grid. 2020. Vol. 11. Iss. 1. P. 281–290. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2921231>.
80. Kolosok I., Gurina L. Calculation of cyber security index in the problem of power system state estimation based on SCADA and WAMS measurements // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). Cham: Springer, 2016. Vol. 8985. P. 172–177. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31664-2_18.
81. Гурина Л.А. Повышение киберустойчивости SCADA и WAMS при кибератаках на информационно-коммуникационную подсистему ЭЭС // Вопросы кибербезопасности. 2022. Т. 2. № 46. С. 18–26. <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2022-2-18-26>.

References

1. Bamberger Y., Baptista J., Belmans R., Buchholz B.M., Chebbo M., Del Valle J.L., et al. Vision and strategy for Europe's electricity networks of the future. In: *European technology platform Smart Grids*. 2006, p. 4-35.
2. Buhholz B.M., Styczynski Z.A. Smart Grids. Fundamentals and technologies in electric power systems of the future, 2017, 461 p. (Russ. ed.: *Smart grids – osnovy i tekhnologii energosistem budushchego*. Moscow: Moscow Power Engineering Institute: 2017, 461 p.)
3. Zuo Hongyan, Zhang Bin, Huang Zhonghua, Wei Kexiang, Zhu Hong, Tan Jiqui. Effect analysis on SOC values of the power lithium manganate battery during discharging process and its intelligent estimation. *Energy*. 2022;238(B):121854. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121854>.
4. Zhao Xiaohuan, E Jiaqiang, Wu Gang, Deng Yuanwang, Han Dandan, Zhang Bin, et al. A review of studies using graphenes in energy conversion, energy storage and heat transfer development. *Energy Conversion and Management*. 2019;184:581-599. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.092>.
5. Mirzaei M.A., Sadeghi-Yazdankhah A., Mohammadi-Ivatloo B., Marzband M., Shafie-khah M., Catalão J.P.S. Integration of emerging resources in IGDT-based robust scheduling of combined power and natural gas systems considering flexible ramping products. *Energy*. 2019;189:116195. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116195>.
6. Karimi H., Jadid S. Optimal energy management for multi-microgrid considering demand response programs: a stochastic multi-objective framework. *Energy*. 2020;195(C):116992. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116992>.
7. Bullich-Massagué E., Díaz-González F., Aragüés-Peñalba M., Girbau-Llistuella F., Olivella-Rosell P., Sumper A. Microg-

- rid clustering architectures. *Applied Energy*. 2018;212:340-361. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.048>.
8. Sadeghi D., Naghshbandy A.H., Bahramara S. Optimal sizing of hybrid renewable energy systems in presence of electric vehicles using multi-objective particle swarm optimization. *Energy*. 2020;209:118471. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118471>.
9. Su Wencong, Wang Jianhui. Energy management systems in microgrid operations. *The Electricity Journal*. 2012;25(8):45-60. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.010>.
10. Khan M.W., Wang Jie, Xiong Linyun. Optimal energy scheduling strategy for multi-energy generation grid using multi-agent systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021;124:106400. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106400>.
11. Xu Da, Zhou Bin, Liu Nian, Wu Qiuwei, Voropai N., Li Canbing, et al. Peer-to-peer multienergy and communication resource trading for interconnected microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021;17(4):2522-2533. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3000906>.
12. Tomin N., Shakirov, V. Kurbatsky V., Muzychuk R., Popova E., Sidorov D, et al. A multi-criteria approach to designing and managing a renewable energy community // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 199. P. 1153–1175. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.151>.
13. Styczynski Z.A., Voropai N.I. *Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics*. Magdeburg: Otto-von- Guericke-Universität Magdeburg; 2010, 209 p. (In Russ.).
14. Fernandez L.P., Roman T.G.S., Cossent R., Domingo C.M., Frías P. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks. *IEEE transactions on power systems*. 2011;26(1):206-213. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2049133>.
15. Valsera-Naranjo E., Martinez-Vicente D., Sumper A., Villafila-Robles R. Deterministic and probabilistic assessment of the impact of the electrical vehicles on the power grid. In: *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. 2011. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039546>.
16. Papadopoulos P., Skarvelis-Kazakos S., Unda I.G., Cipcigan L. Electric vehicles' impact on British distribution networks. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2012;2(3):91-102. <https://doi.org/10.1049/iet-est.2011.0023>.
17. Vlachogiannis J.G. Probabilistic constrained load flow considering integration of wind power generation and electric vehicles. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2009;24(4):1808-1817.
18. Duan Min, Darvishan A., Mohammaditab R., Wakil K., Abedinia O. A novel hybrid prediction model for aggregated loads of buildings by considering the electric vehicles. *Sustainable Cities and Society*. 2018;41:205-219. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.009>.
19. Faridimehr S., Venkatachalam S., Chinnam R.B. A stochastic programming approach for electric vehicle charging network design. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2018;20(5):1870-1882. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2841391>.
20. Morshed M.J., Hmida J.B., Fekih A. A probabilistic multi-objective approach for power flow optimization in hybrid wind-PV-PEV systems. *Applied Energy*. 2018;211:1136-1149. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.101>.
21. Zhao L., Prousch S., Hübner M., Moser A. Simulation methods for assessing electric vehicle impact on distribution grids. In: *IEEE PES T&D 2010*. 2010. <https://doi.org/10.1109/TDC.2010.5484386>.
22. Lopes J.A.P., Soares F.J., Almeida P.M.R. Integration of electric vehicles in the electric power system. *Proceedings of the IEEE*. 2011;99(1):168-183. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2066250>.
23. Almoghatthawi Ya., Barker K. Component importance measures for interdependent infrastructure network resilience. *Computers & Industrial Engineering*. 2019;133:153-164. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.05.001>.
24. Hu Junjie, Morais Hugo, Sousa Tiago, Lind Morten. Electric vehicle fleet management in smart grids: a review of services, optimization and control aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;56:1207-1226. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.014>.
25. Mwasilu F., Justo J.J., Kim Eun-Kyung, Do Ton Duc. Electric vehicles and smart grid interaction: a review on vehicle to grid and renewable energy sources integration. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2014;34:501-516. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.031>.
26. Tan Kang Miao, Ramachandaramurthy V.K., Yong Jia Ying. Integration of electric vehicles in smart grid: a review on vehicle to grid technologies and optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;53:720-732. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.012>.
27. Sortomme E., El-Sharkawi M.A. Optimal scheduling of vehicle-to-grid energy and ancillary services. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012;3(1):351-359.
28. Xu Xiandong, Jia Hongjie, Wang Dan, Yu David C., Chiang Hsiao-Dong. Hierarchical energy management system for multi-source multi-product microgrids. *Renewable Energy*. 2015;78:621-630. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.039>.
29. Xu Xiandong, Jin Xiaolong, Jia Hongjie, Yu Xiaodan, Li Kang. Hierarchical management for integrated community energy systems. *Applied Energy*. 2015;160:231-243. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.134>.

30. Ramírez-Elizondo L.M., Paap G.C. Scheduling and control framework for distribution level systems containing multiple energy carrier systems: Theoretical approach and illustrative example. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2015;66:194-215. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.10.045>.
31. Liu Jinglu, Wang Anna, Wang Xingyu, Tao Ran. Coupled distributed control scheme for multi-energy systems with transmission losses based on event-triggered communication. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2020;12:055302. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/5.0024714>.
32. Arnold M., Negenborn R.R., Andersson G., De Schutter B. Distributed predictive control for energy hub coordination in coupled electricity and gas networks. In: *Intelligent Infrastructures*. Dordrecht: Springer; 2010, vol. 42, p. 235-273. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3598-1_10.
33. Skarvelis-Kazakos S., Papadopoulos P., Unda I.G., Gorman T., Belaidi A., Zigan S. Multiple energy carrier optimisation with intelligent agents. *Applied Energy*. 2016;167:323-335. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.130>.
34. Gomes L., Vale Z., Corchado J.M. Microgrid management system based on a multi-agent approach: an office building pilot. *Measurement*. 2020;154:107427. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107427>.
35. Anvari-Moghaddam A., Rahimi-Kian A., Mirian M.S., Guerrero J.M. A multi-agent based energy management solution for integrated buildings and microgrid system. *Applied Energy*. 2017;203:41-56. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.007>.
36. Wang Lingfeng, Wang Zhu, Yang Rui. Intelligent multiagent control system for energy and comfort management in smart and sustainable buildings. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012;3(2):605-617. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2178044>.
37. Poulin C., Kane M.B. Infrastructure resilience curves: performance measures and summary metrics. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021;216:107926. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107926>.
38. Khan M.W., Wang Jie, Xiong Linyun, Ma Meiling. Modelling and optimal management of distributed microgrid using multiagent systems. *Sustainable Cities and Society*. 2018;41:154-169. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.018>.
39. Bünning F., Wetter M., Fuchs M., Müller D. Bidirectional low temperature district energy systems with agent-based control: Performance comparison and operation optimization. *Applied Energy*. 2018;209:502-515. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.072>.
40. Ren Yi, Fan Dongming, Feng Qiang, Wang Zili, Sun Bo, Yang Dezhen. Agent-based restoration approach for reliability with load balancing on smart grids. *Applied Energy*. 2019;249:46-57. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.119>.
41. Ahčin P., Šikić M. Simulating demand response and energy storage in energy distribution systems. In: *International Conference on Power System Technology*. 2010. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2010.5666564>.
42. Sharma P., Mathur H.D., Mishra P., Bansal R.C. A critical and comparative review of energy management strategies for microgrids. *Applied Energy*. 2022;327:120028. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120028>.
43. Salehi N., Martínez-García H., Velasco-Quesada G., Guerrer J.M. A comprehensive review of control strategies and optimization methods for individual and community microgrids. *IEEE Access*. 2022;10:15935-15955. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3142810>.
44. Shulyma O., Davidsson P., Shendryk V., Marchenko A. The architecture of an information system for the management of hybrid energy grids. In: *Position Papers of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems*. 2015;6:281-288. <https://doi.org/10.15439/2015F402>.
45. Lawrence T.M., Watson R.T., Boudreau M.-C., Mohammadpour J. Data flow requirements for integrating smart buildings and a smart grid through model predictive control. *Procedia Engineering*. 2017;180:1402-1412. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.303>.
46. Zia M.F., Elbouchikhi E., Benbouzid M. Microgrids energy management systems: a critical review on methods, solutions, and prospects. *Applied Energy*. 2018;222:1033-1055. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.103>.
47. Fontenot H., Dong Bing. Modeling and control of building-integrated microgrids for optimal energy management – a review. *Applied Energy*. 2019;254:113689. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113689>.
48. Qahmash A., Algarni A., Hussain M.R. A comprehensive review on integration challenges, optimization techniques and control strategies of hybrid AC/DC Microgrid. *Applied Sciences*. 2021;11(14):6242. <https://doi.org/10.3390/app11146242>.
49. Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G., Sokolov D., Zhou Bin. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach. *Applied Energy*. 2022;309:118487. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118487>.
50. Bhargavi K.M., Jayalakshmi N.S., Gaonkar D.N., Ashish S. A comprehensive review on control techniques for power management of isolated DC microgrid system operation. *IEEE Access*. 2021;9:32196-32228. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060504>.
51. Panaparambil V.S., Kashyap Y., Castelino R.V. A review on hybrid source energy management strategies for electric vehicle. *International Journal of Energy Research*. 2021;45(14):19819-19850. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/er.7107.52>.
- Ma Guolong, Li Jianing, Zhang Xiao-Ping. A review on optimal energy management of multimicrogrid system considering uncertainties. *IEEE Access*. 2022;10:77081-77098. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3192638>.
53. Yu Rong, Ding Jiefei, Maharjan S., Gjessing S., Zhang Yan, Tsang Danny H.K. Decentralized and optimal resource coop-

- eration in geo-distributed mobile cloud computing. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*. 2018;6(1):72-84. <https://doi.org/10.1109/TETC.2015.2479093>.
54. Ahvar E., Orgerie A.-C., L  bre A. Estimating energy consumption of cloud, fog and edge computing infrastructures. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*. 2019;7(2):277-288. <https://doi.org/10.1109/TSUSC.2019.2905900>.
55. Mishra S., Anderson K., Miller B., Boyer K., Warren A. Microgrid resilience: a holistic approach for assessing threats, identifying vulnerabilities, and designing corresponding mitigation strategies. *Applied Energy*. 2020;264:114726. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114726>.
56. Lu Yang, Xu Li Da. Internet of things (IoT) cybersecurity research: a review of current research topics. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019;6(2):2103-2115. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2869847>.
57. Atzori L., Iera A., Morabito G. The internet of things: a survey. *Computer Networks*. 2010;54(15):2787-2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.
58. Roman R., Zhou Jianying, Lopez J. On the features and challenges of security and privacy in distributed internet of things. *Computer Networks*. 2013;57(10):2266-2279. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2012.12.018>.
59. Nejabatkhah F., Li Yun Wei, Liang Hao, Ahrabi R.R. Cyber-security of smart microgrids: a survey. *Energies*. 2020;14(1):27. <https://doi.org/10.3390/en14010027>.
60. Zhao Chengcheng, He Jianping, Cheng Peng, Chen Jiming. Analysis of consensus-based distributed economic dispatch under stealthy attacks. *Transactions on Industrial Electronics*. 2017;64(6):5107-5117. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2638400>.
61. Li Peikai, Liu Yun, Xin Huanhai, Jiang Xichen. A robust distributed economic dispatch strategy of virtual power plant under cyber-attacks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018;14(10):4343-4352. <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2788868>.
62. Kosut O., Jia Liyan, Thomas R.J., Tong Lang. Malicious data attacks on the smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2011;2(4):645-658. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2163807>.
63. Xie Le, Mo Yilin, Sinopoli Bruno. Integrity data attacks in power market operations. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2011;2(4):659-666. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2161892>.
64. Estay D.A.S., Sahay R., Barfod M.B., Jensen C.D. A systematic review of cyber-resilience assessment frameworks. *Computers & Security*. 2020;97:101996. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2020.101996>.
65. Tang Sirui, Liu Zhaoxi, Wang Lingfeng. Power system reliability analysis considering external and insider attacks on the SCADA system. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*. 2020. <https://doi.org/10.1109/TD39804.2020.9299922>.
66. Chen Bo, Wang Jianhui, Shahidehpour M. Cyber-physical perspective on smart grid design and operation. *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*. 2018;3:129-141. <https://doi.org/10.1049/iet-cps.2017.0143>.
67. Xie Le, Mo Yilin, Sinopoli B. False data injection attacks in electricity markets. *First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*. 2010. <https://doi.org/10.1109/SMARTGRID.2010.5622048>.
68. Jia Liyan, Thomas R.J., Tong Lang. Impacts of malicious data on real-time price of electricity market operations. In: *Proceedings of the IEEE Hawaii International Conference on System Sciences*. 4–7 January 2012, Maui, HI. Maui, HI: IEEE; p. 1907-1914. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2012.313>.
69. Deng Chao, Wang Yu, Wen Changyun, Xu Yan, Lin Pengfeng. Distributed resilient control for energy storage systems in cyber-physical microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021;17(2):1331-1341. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2981549>.
70. Sahoo S., Dragi  evi   T., Blaabjerg F. Cyber security in control of grid-tied power electronic converters—challenges and vulnerabilities. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2019;9(5):5326-5340. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2953480>.
71. Beg O.A., Johnson T.T., Davoudi A. Detection of false-data injection attacks in cyber-physical DC microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2017;13(5):2693-2703. <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2656905>.
72. Arghandeh R., Meier A., Mehrmanesh L., Mili L. On the definition of cyber-physical resilience in power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;58:1060-1069. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.193>.
73. Lu Lin-Yu, Liu Hao Jan, Zhu Hao, Chu Chia-Chi. Intrusion detection in distributed frequency control of isolated microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019;10(6):6502-6515. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2906573>.
74. Sahoo S., Mishra S., Peng Jimmy Chih-Hsien, Dragicevic T. A stealth cyber-attack detection strategy for DC microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018;34(8):8162-8174. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2879886>.
75. Abhinav S., Modares H., Lewis F.L., Ferrese F., Davoudi A. Synchrony in networked microgrids under attacks. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2017;9(6):6731-6741. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2721382>.
76. Bidram A., Poudel B., Damodaran L., Fierro R., Guerrero J.M. Resilient and cybersecure distributed control of inverter-based islanded microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020;16(6):3881-3894. <https://doi.org/10.1109/>

TII.2019.2941748.

77. Dehkordi N.M., Baghaee H.R., Sadati N., Guerrero J.M. Distributed noise-resilient secondary voltage and frequency control for islanded microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019;10(4):3780-3790. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2834951>.

78. Ding Lei, Han Qing-Long, Wang Le Yi, Sindi E. Distributed cooperative optimal control of DC microgrids with communication delays. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018;14(9):3924-3935. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2799239>.

79. Duan Jie, Chow Mo-Yuen. Robust consensus-based distributed energy management for microgrids with packet losses tolerance. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020;11(1):281-290. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2921231>.

80. Kolosok I., Gurina L. Calculation of cyber security index in the problem of power system state estimation based on SCADA and WAMS measurements. In: *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Cham: Springer; 2016, vol. 8985, p. 172-177. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31664-2_18.

81. Gurina L. Increasing cyber resilience of SCADA and WAMS in the event of cyber attacks on the information and communication subsystem of the electric power system. *Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity issues*. 2022;2(46):18-26. <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2022-2-18-26>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Томин Никита Викторович,

к.т.н.,
заведующий лабораторией,
Отдел электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
tomin.nv@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5898-9649>

Домышев Александр Владимирович,

к.т.н.,
научный сотрудник,
Отдел электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
domyshev@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2770-2531>

Барахтенко Евгений Алексеевич,

к.т.н., доцент,
старший научный сотрудник,
Отдел трубопроводных систем энергетики,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
barakhtenko@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6934-0025>

Шакиров Владислав Альбертович,

к.т.н., доцент,
заведующий лабораторией,
Отдел комплексных и региональных проблем
энергетики,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
mynovember@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8629-9549>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikita V. Tomin,

Cand. Sci. (Eng.),
Head of Laboratory,
Department of Electric Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
tomin.nv@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5898-9649>

Alexander V. Domyshev,

Cand. Sci. (Eng.),
Researcher,
Department of Electric Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
domyshev@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2770-2531>

Evgeniy A. Barakhtenko,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Senior Researcher,
Energy Pipeline Systems Department,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
barakhtenko@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6934-0025>

Vladislav A. Shakirov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of Laboratory,
Department of Complex and Regional Energy Problems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
mynovember@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8629-9549>

Козлов Александр Николаевич,
к.т.н.,
старший научный сотрудник,
Отдел теплосиловых систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
kozlov@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5983-5884>

Сосновский Илья Константинович,
аспирант,
инженер,
Отдел теплосиловых систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
sosnovskiy71@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-3153-9898>

Лю Фанг,
профессор,
Центральный Южный университет,
410017, Чанша, провинция Хунань, Китай
csuliufang@csu.edu.cn
<https://orcid.org/0000-0003-0750-8344>

Сидоров Денис Николаевич,
д-р ф.-м. наук, профессор РАН,
главный научный сотрудник,
Отдел прикладной математики,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
contact.dns@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3131-1325>

Alexander N. Kozlov,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Thermal Power Systems Department,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
kozlov@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5983-5884>

Ilya K. Sosnovsky,
Postgraduate Student,
Engineer,
Thermal Power Systems Department,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
sosnovskiy71@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-3153-9898>

Fang Liu,
Professor,
Central South University,
Changsha Hunan 410017 China,
csuliufang@csu.edu.cn
<https://orcid.org/0000-0003-0750-8344>

Denis N. Sidorov,
Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Professor of the Russian Academy of Sciences,
Chief Researcher,
Applied Mathematics Department,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
contact.dns@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3131-1325>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Сидоров Д.Н. является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2019 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 27.09.2023 г.;
одобрена после рецензирования 17.10.2023 г.;
принята к публикации 12.11.2023 г.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

Denis N. Sidorov has been a member of the editorial board of the iPolytech Journal since 2019, but she did not take part in making decision about publishing the article under consideration. The article was reviewed following the Journal's review procedure. The authors did not report any other conflicts of interest.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 27.09.2023;
approved after reviewing 17.10.2023;
accepted for publication 12.11.2023.