

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-748-754

УДК 004.031.4 004.032.2

## Концепция управления сетевой структурой интеллектуальных устройств в условиях цифровой трансформации энергетической отрасли

Владимир Николаевич Шведенко<sup>1</sup>, Андрей Евгеньевич Мозохин<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук (ВИНИТИ РАН), Москва, 125190, Российская Федерация

<sup>2</sup> Филиал ПАО «МРСК Центра» – «Костромаэнерго», Кострома, 156961, Российская Федерация

<sup>1</sup> [vv\\_shved@mail.ru](mailto:vv_shved@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3223-4982>

<sup>2</sup> [mozokhin@mail.ru](mailto:mozokhin@mail.ru)✉, <https://orcid.org/0000-0003-4673-8425>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Современная электроэнергетическая система представляет собой сложную организационную структуру, которая обеспечивает координацию ее интеллектуальных компонентов через определение ролей, каналов связи и полномочий. Система управления интеллектуальными компонентами электроэнергетической системы должна обеспечивать согласованность их работы на технологических этапах генерации, транспорта, распределения и потребления электрической энергии, при достижении целевых ориентиров и снижении величины ресурсопотребления. Недостаток используемой в настоящее время системы управления технологическими процессами в электроэнергетических системах в том, что иерархическая структура управления применяется к сетевой топологии. Таким образом, возникает конфликты ресурсов и процессов генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии. **Метод.** Предложена концепция распределенной системы управления ресурсопотреблением и процессами в электроэнергетических системах с применением технологии цифровых двойников. **Основные результаты.** Электроэнергетическая система моделируется как полиструктурная. Используются понятия системы показателей полиструктуры, метрической системы полиструктуры, тела полиструктуры. Представление компонентов электроэнергетической системы и технологических процессов генерации, транспорта, распределения и потребления посредством технологии цифровых двойников, позволяет исключить конфликты ресурсов и процессов в электроэнергетической системе при сохранении требований к надежности и безопасности системы. **Практическая значимость.** Технология цифрового двойника применительно к полиструктурным системам предоставляет разработчикам распределенных систем управления методологию создания современной системы управления, где выработка управленческих решений не приводит к конфликтам компонентов электроэнергетической системы. Предлагаемая распределенная система управления строится как полиструктура, тело которой выполняет роль обеспечения согласованности технологических процессов, ресурсов оборудования и потребления электроэнергии.

### Ключевые слова

электроэнергетическая система, полиструктурная система, сетевое управление, интеллектуальные электронные устройства, цифровой двойник

**Ссылка для цитирования:** 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. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-748-754

## The concept of managing the network structure of intelligent devices in the digital transformation of the energy industry

Vladimir N. Shvedenko<sup>1</sup>, Andrey E. Mozokhin<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125190, Russian Federation

<sup>2</sup> IDGC Branch of Centre — Kostromaenergo, Kostroma, 156961, Russian Federation

<sup>1</sup> vv\_shved@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3223-4982>

<sup>2</sup> mozokhin@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4673-8425>

### Abstract

A modern electric power system is a complex organizational structure that coordinates its intelligent components through the definition of roles, communication channels and powers. The management system of intelligent components of the electric power system should ensure the consistency of their work at technological stages of generation, transport, distribution and consumption of electric energy, while achieving the targets and reducing the value of resource consumption. The disadvantage of the process management system that is currently used in electric power systems is that the hierarchical management structure is applied to the network topology. Thus, there is a conflict of resources and processes of generation, transport, distribution and consumption of electricity. The authors propose a concept of a distributed resource and process management system in electric power systems using digital twin technology. The electrical power system is modeled as a polystructural one. The concepts of the system of polystructure indicators, the metric system of polystructure, the body of polystructure are used. Representation of electric power system components and technological processes of generation, transport, distribution and consumption by means of digital twin technology makes it possible to exclude conflicts of resources and processes in the electric power system while maintaining the requirements for reliability and safety of the system. Digital twin technology, as applied to polystructured systems, provides the developers of distributed management systems with a methodology for creating a modern management system, where the production of management decisions does not lead to conflicts between the components of the power system. The proposed distributed management system is built as a polystructure, the body of which ensures the consistency of technological processes, equipment resources and electricity consumption.

### Keywords

electric power system, polystructural system, network management, intelligent electronic devices, digital twin

**For citation:** 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). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-748-754

### Введение

Применение сквозных цифровых технологий Индустрии 4.0 на объектах электроэнергетической системы (ЭЭС) способствует ускоренной цифровой трансформации отрасли [1]. Согласно требованиям стандартов электроэнергетических организаций высокий уровень надежности и бесперебойности электроснабжения потребителей зависит от наблюдаемости и управляемости на всех этапах технологического процесса производства и транспорта электроэнергии. Отсутствие взаимосвязи в работе внедряемых интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) приводит к необходимости создания современной концепции управления компонентами ЭЭС.

Основная причина, снижающая эффективность функционирования сетевых структур энергоснабжения – наличие иерархических систем управления на всех этапах жизненного цикла производства и потребления электроэнергии. Что приводит к противоречиям, которые создают условия для конфликтов между компонентами ЭЭС при распределении и потреблении ресурсов на этапах технологических процессов [2–4].

Цифровая трансформация в электросетевом комплексе позволяет достичь требуемого уровня управляемости и наблюдаемости системы электроснабжения путем масштабного внедрения технологий интеллектуальной ЭЭС, таких как цифровая подстанция, ин-

теллектуальные системы учета электроэнергии, системы автоматической ликвидации аварий воздушных и кабельных линий электропередачи. Однако попытки интеграции данных с ИЭУ генераторов, электрических подстанций и высоковольтных линий в единую информационную систему приводят к сложностям, связанным с отсутствием единого стандарта информационного обмена между технологическими и корпоративными информационными системами, несогласованной работой организационных структур, генерацией избыточного трафика в сеть и ряд других факторов, рассмотренных в работах [5, 6].

Ранее в работе [7] представлена методология обеспечения информационного взаимодействия и мониторинга технологических процессов в ЭЭС на основе теории полиструктурных систем. Согласно данной методологии ЭЭС имеет общий центр согласования целевых ориентиров входящих в ее состав подсистем, для мониторинга и распределения используемых ресурсов и оценки достигаемых синергетических эффектов. При этом виды взаимодействия систем и их составных элементов подчинены технологическим и организационным правилам функционирования отдельных ее элементов. В развитии предложенной методологии организации полиструктурной ЭЭС, рассмотрим концепцию управления ЭЭС на этапах технологических процессов генерации, транспорта, распределения и потребления электрической энергии.

### Информационное взаимодействие компонентов полиструктуры ЭЭС

Особенностью современной ЭЭС является тот факт, что ее инфраструктура состоит из множества независимых ИЭУ, которые выполняют свои функции. Однако они по-разному оказывают влияние на эффективность функционирования системы в целом и достижения целевых показателей функционирования ЭЭС: высокая надежность, низкая аварийность, бесперебойность и гарантированность электроснабжения потребителей, низкий уровень потерь электроэнергии. Потому ЭЭС с ИЭУ на концептуальном уровне следует рассматривать как полиструктурную систему, где взаимодействие компонентов полиструктуры осуществляется с учетом происходящих технологических процессов генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии.

Показатели состояния отдельных элементов полиструктурной системы имеют общую основу, связанную с ресурсным обеспечением полиструктуры и другими параметрами состояния среды, в которой она находится. Объединенное множество показателей элементов полиструктурной системы назовем системой показателей полиструктуры. Идеальный или реальный физический объект, содержащий множество показателей полиструктуры, образует особый ее элемент, формирующий синергетический эффект полиструктурной системы, который в дальнейшем будем называть телом полиструктуры. Обязательная функция тела полиструктуры — обеспечение информационного взаимодействия всех элементов полиструктурной системы, согласование их целевых ориентиров для достижения целевых показателей полиструктурной системы в целом.

Для реализации информационного взаимодействия между ИЭУ полиструктуры рекомендовано специальным образом организовать метрическую систему сбора, обработки, хранения и передачи информационных ресурсов (далее — метрическая система). Информационное взаимодействие тела с другими ИЭУ полиструктурной системы осуществляется посредством установления между ними двунаправленных связей, которые назовем коллинеарными. Метрическая система тела полиструктуры ЭЭС организует перевод данных в единую систему измерений и ее обработку с последующей передачей данных по коллинеарным связям потребителям, которыми могут выступать объекты и процессы полиструктуры.

На рис. 1 представлена структурная схема организации информационных потоков по коллинеарным связям полиструктурной системы.

### Управления сетевой структурой процессов генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии

Для организации современной системы управления ЭЭС необходимо иметь достаточный объем первичной информации о состоянии компонентов и параметров их работы в режиме протекания технологических процессов генерации, транспорта, распределения и

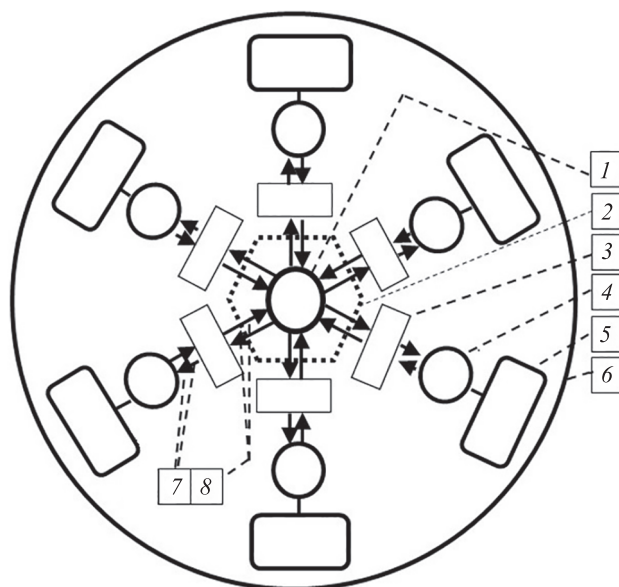


Рис. 1. Схема информационных потоков по коллинеарным связям полиструктурной системы: 1 — метрическая система тела полиструктурной системы; 2 — тело полиструктурной системы; 3 — валидатор фильтрации, группировки и преобразования данных, поступающих из метрической системы элемента полиструктурной системы; 4 — метрическая система элемента полиструктурной системы; 5 — компонент полиструктурной системы; 6 — полиструктурная система; 7, 8 — коллинеарные двунаправленные связи

Fig. 1. Scheme of information streams on collinear links of the polystructural system, where 1 — metric system of the body of the polystructural system; 2 — body of the polystructural system; 3 — validator of filtering, grouping and transformation of data coming from the metric system of the polystructural system element; 4 — metric system of the polystructural system element; 5 — component of the polystructural system; 6 — polystructural system; 7, 8 — collinear bidirectional links

потребления электроэнергии. При этом на всех этапах технологических процессов в ЭЭС присутствуют уникальные ИЭУ с индивидуальным набором данных, необходимым для информационного взаимодействия с другими компонентами системы [8–10]. Для анализа поступающей от ИЭУ первичной информации и реализации распределенного управления требуется трансляция данных физических объектов в цифровую среду полиструктурной системы.

В полиструктуре ЭЭС данные, полученные от ИЭУ и датчиков физической среды, оцифровываются и передаются по каналам связи в цифровую среду. Под физической средой ЭЭС понимаем элементы конструкции сети (опоры электропередачи, траверсы, объекты капитального строительства электрических подстанций), их состояние, уровень потерь электрической энергии на всех технологических этапах, уровень потребления собственных нужд компонентов ЭЭС, а также человеческий фактор, оказывающий воздействие на показатели состояния физической среды. Цифровая среда полиструктуры 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 моделей компонентов ЭЭС и полиструктуры в целом. В результате чего полиструктура ЭЭС состоит из множества разноплановых цифровых моделей компонентов, взаимосвязанных через информационные потоки. Основное преимущество предлагаемой концепции управления ЭЭС — возможность включения в ее состав новых элементов или исключения из структуры компонентов генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии.

В полиструктуре ЭЭС выделим следующие подсистемы: генерации, транспорта и распределения электроэнергии; электроснабжения потребителей; безопасности и мониторинга; управления и связи. На рис. 2 представлен порядок формирования цифровой модели компонента подсистемы ЭЭС и определение коллинеарных связей между реальными объектами физической среды и их виртуальными аналогами в цифровой среде полиструктурной ЭЭС.

Система управления полиструктурой ЭЭС в режиме реального времени контролирует состояние целевых параметров на объектах электроснабжения, а также корректирует их величину при помощи исполнительных механизмов воздействия. Целевыми параметрами работы полиструктурной ЭЭС является достижение минимальных технических и коммерческих потерь



Рис. 2. Порядок формирования цифровой модели компонента и установление коллинеарных связей между реальными и виртуальными объектами

Fig. 2. The stages of formation of a component's digital model and determination of collinear links between real and virtual objects

электроэнергии, а также снижение информационного трафика между ИЭУ внутри каждой подсистемы ЭЭС и между подсистемами на технологических этапах генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии.

Как видно из рис. 3 коллинеарные связи имеют замыкающий характер. Особенность управления на основе коллинеарных связей в том, что сигнал проходит кольцевую структуру и модифицируется с возвращением в исходную точку. Цикл управления полиструктурой ЭЭС должен включать кольцевую структуру связи не только между ИЭУ одной подсистемы ЭЭС, но и между подсистемами. При этом итерационный процесс продолжается до момента установления равновесного состояния параметров физической среды, при котором обеспечивается наиболее рациональная работа объектов энергетической системы.

На основе предложенной концепции управление полиструктурной ЭЭС осуществляется с помощью средств цифровых моделей компонентов ЭЭС, участвующих в технологическом процессе генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии. В цифровой среде в процессе рекурсивного управления создается сетевая структура взаимодействующих по средствам коллинеарных связей цифровых моделей компонентов полиструктуры ЭЭС. Рекурсия осуществляется непрерывно по мере поступления информа-

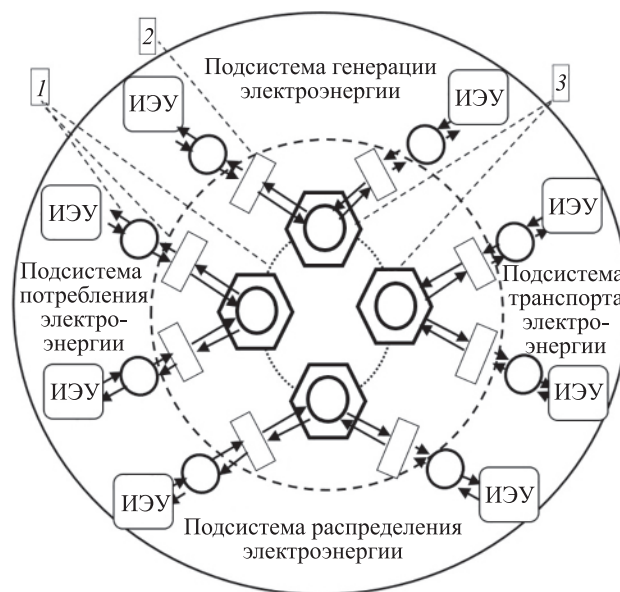


Рис. 3. Схема взаимодействия цифровых моделей подсистем полиструктурной электроэнергетической системы:

1 — коллинеарные двусторонние связи типа информация–информация; 2 — граница разделения физической и цифровой сред полиструктуры; 3 — тела подсистем полиструктурной электроэнергетической системы

Fig. 3. Scheme of interaction of digital models of subsystems of a polystructural electric power system, where 1 — collinear bidirectional links of information–information type; 2 — separation boundary of physical and digital environments of the polystructure; 3 — bodies of subsystems of a polystructural electric power system

ции от источников данных. Синтез цифровых моделей компонентов на основании рекурсии в итоге позволяет создать цифровую модель с коллинеарными связями и объединить указанные выше модели обработки информации в единую структуру. Такой алгоритм обработки информации генерирует управленческие решения в соответствии с заданным лагом времени вплоть до режима реального времени. Отечественный и зарубежный опыт практического применения программных платформ для создания цифровых двойников энергетических объектов и систем представлен в работе [11].

Цифровой двойник полиструктурной ЭЭС представляет собой сложный программный продукт, который создан на основе самых разнообразных данных и технологий, и объединяет в себе искусственный интеллект [12], компьютерное обучение [13], формирование кластера больших данных [14] и программное обеспечение со специальными данными для формирования цифровых моделей компонентов [15]. Структурная схема взаимодействия между компонентами полиструктурной ЭЭС и их цифровыми двойниками представлена на рис. 4.

Сбор данных от различных ИЭУ компонентов ЭЭС осуществляется по результатам работы интеграционной шины, реализующей принцип консолидации информации для различных протоколов устройств, входящих в полиструктурную ЭЭС. Перед поступлением первичных данных из физической в цифровую среду

они подвергаются процедуре валидации. В результате отсеиваются шумы, не корректные или ложные данные. Дальнейшая процедура обработки и анализа входных данных происходит в цифровой среде. Цифровой двойник выдает рекомендуемые управленческие воздействия в организационную структуру управления, которая учитывает корпоративную политику совместной работы организаций топливно-энергетического комплекса. В основу системы управления полиструктурной ЭЭС положена сервис-ориентированная архитектура, ядро которого — цифровой двойник. Целью управления структурами разных компонентов ЭЭС являются достижение минимума используемой мощности и снижение информационного трафика между ИЭУ.

Для реализации на практике механизмов интеллектуальной обработки данных в функциональных модулях цифрового двойника ЭЭС применяются запатентованные способы построения объектно-процессной модели данных:

- при организации валидации первичных данных и создания баз данных используются специализированные контейнеры хранения, содержащие набор сервисов, необходимых для работы с каждым отдельным компонентом ЭЭС на каждой из стадий ее жизненного цикла, как это описано в патенте на изобретение универсальное хранилище данных [16];
- при формировании цифровой модели компонентов ЭЭС применяется способ создания топологий метамодели информационного пространства предметной области [17];
- для анализа данных при формировании управляющих воздействий на компоненты ЭЭС, расположенные в физической среде, используется способ агрегирования и преобразования данных и устройство для его реализации [18];
- цифровой двойник ЭЭС создается как интегрированная система управления, которая позволяет объединить разнофункциональные программные продукты и системы, осуществляющие информационную поддержку компонентов ЭЭС на этапах его жизненного цикла. Для практической реализации использован способ создания информационного обеспечения информационно-управляющей системы на основе инвариантных информационных структур [19].

### Заключение

Процессы производства, транспорта, распределения и потребления электроэнергии рассматриваются с позиции теории полиструктурных систем. Цифровая трансформация способствует формированию моделей объектов электроэнергетической системы и их цифровых двойников для взаимодействия физической и цифровой сред в режиме регламента исполнения технологических процессов генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии. При этом поиск оптимального управления носит итерационный характер и продолжается до момента установления равновесного состояния параметров всех объектов физической среды. Для выработки управляющих воздей-



Рис. 4. Структурная схема взаимодействия между компонентами полиструктурной электроэнергетической системы и их цифровыми двойниками

Fig. 4. Structural scheme of interaction between the components of a polystructural electric power system and their digital twins

ствий на компоненты электроэнергетической системы предложена сетевая структура цифровых моделей, взаимодействующих по средствам коллинеарных связей. Особенность предложенной концепции управления состоит в экономии ресурса самих компонентов за счет моделирования процесса управления в пространстве

цифровых моделей полиструктурной электроэнергетической системы. Реализацию управления компонентами электроэнергетической системы предложено осуществить с применением технологии цифровых двойников как эффективного способа киберфизического взаимодействия.

### Литература

1. Masera M., Bompard E.F., Profumo F., Hadsaid N. Smart (electricity) grids for smart cities: assessing roles and societal impacts // *Proceedings of the IEEE*. 2018. V. 106. N 4. P. 613–625. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2812212>
2. Du Y., Tu H., Lukic S., Lubkeman D., Dubey A., Karsai G. Development of a controller hardware-in-the-loop platform for microgrid distributed control applications // *Proc. 3<sup>rd</sup> IEEE International Workshop on Electronic Power Grid (eGrid)*. 2018. P. 8598696. <https://doi.org/10.1109/eGRID.2018.8598696>
3. Zhao C., Chen J., He J., Cheng P. Privacy-preserving consensus-based energy management in smart grids // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2018. V. 66. N 23. P. 6162–6176. <https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2872817>
4. Wang K., Hu X., Li H., Li P., Zeng D., Guo S. A Survey on Energy Internet Communications for Sustainability // *IEEE Transactions on Sustainable Computing*. 2017. V. 2. N 3. P. 231–254. <https://doi.org/10.1109/TSUSC.2017.2707122>
5. 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>
6. Мозохин А.Е., Мозохин А.Е. Анализ перспективного развития энергетических систем в условиях цифровой трансформации российской экономики // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2020. Т. 20. № 1. С. 82–93. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-1-82-93>
7. Shvedenko V.N., Mozokhin A.E. Methodological foundations for the formation of information space and digital twin objects in smart homes // *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 2019. V. 53. N 6. P. 303–308. <https://doi.org/10.3103/S0005105519060074>
8. Ayani M., Ganebäck M., Ng A.H.C. Digital Twin: applying emulation for machine reconditioning // *Proc. 51<sup>st</sup> CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP CMS)*. 2018. P. 243–248. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.139>
9. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. Springer, 2017. P. 85–113. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)
10. Uhlemann T.H.J., Schock C., Lehmann C., Freiburger S., Steinhilper R. The digital twin: demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems // *Procedia Manufacturing*. 2017. V. 9. P. 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.043>
11. Мозохин А.Е., Черкасова Н.В. Анализ программных платформ по созданию цифровых двойников для энергетических объектов и систем на этапах их жизненного цикла // *Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования*. 2020. № 6(58). С. 322–334.
12. Muthusamy V., Slominski A., Ishakian V. Towards enterprise-ready AI deployments minimizing the risk of consuming AI models in business applications // *Proc. 1<sup>st</sup> International Conference on Artificial Intelligence for Industries (AI4I)*. 2018. P. 108–109. <https://doi.org/10.1109/AI4I.2018.8665685>
13. Islam T., Hashem M.M.A. A big data management system for providing real time services using fog infrastructure // *Proc. 2018 IEEE Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE)*. 2018. P. 85–89. <https://doi.org/10.1109/ISCAIE.2018.8405449>
14. Essl A., Ortner A., Haas R., Hettegger P. Machine learning analysis for a flexibility energy approach towards renewable energy integration with dynamic forecasting of electricity balancing power // *Proc. 14<sup>th</sup>*

### References

1. Masera M., Bompard E.F., Profumo F., Hadsaid N. Smart (electricity) grids for smart cities: assessing roles and societal impacts. *Proceedings of the IEEE*, 2018, vol. 106, no. 4, pp. 613–625. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2812212>
2. Du Y., Tu H., Lukic S., Lubkeman D., Dubey A., Karsai G. Development of a controller hardware-in-the-loop platform for microgrid distributed control applications. *Proc. 3<sup>rd</sup> IEEE International Workshop on Electronic Power Grid (eGrid)*, 2018, pp. 8598696. <https://doi.org/10.1109/eGRID.2018.8598696>
3. Zhao C., Chen J., He J., Cheng P. Privacy-preserving consensus-based energy management in smart grids. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, vol. 66, no. 23, pp. 6162–6176. <https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2872817>
4. Wang K., Hu X., Li H., Li P., Zeng D., Guo S. A Survey on Energy Internet Communications for Sustainability. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 2017, vol. 2, no. 3, pp. 231–254. <https://doi.org/10.1109/TSUSC.2017.2707122>
5. 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>
6. Mozokhin A.E., Mozokhin A.E. Perspective development of energy systems in conditions of Russian economy digital transformation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 82–93. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-1-82-93>
7. Shvedenko V.N., Mozokhin A.E. Methodological foundations for the formation of information space and digital twin objects in smart homes. *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*, 2019, vol. 53, no. 6, pp. 303–308. <https://doi.org/10.3103/S0005105519060074>
8. Ayani M., Ganebäck M., Ng A.H.C. Digital Twin: applying emulation for machine reconditioning. *Proc. 51<sup>st</sup> CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP CMS)*, 2018, pp. 243–248. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.139>
9. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, Springer, 2017, pp. 85–113. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)
10. Uhlemann T.H.J., Schock C., Lehmann C., Freiburger S., Steinhilper R. The digital twin: demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 9, pp. 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.043>
11. Mozokhin A.E., Cherkasova N.V. Analysis of application software platforms to create digital twins for energy facilities and systems at the life cycle stages. *Information and economic aspects of standardization and technical regulation*, 2020, no. 6(58), pp. 322–334. (in Russian)
12. Muthusamy V., Slominski A., Ishakian V. Towards enterprise-ready AI deployments minimizing the risk of consuming AI models in business applications. *Proc. 1<sup>st</sup> International Conference on Artificial Intelligence for Industries (AI4I)*, 2018, pp. 108–109. <https://doi.org/10.1109/AI4I.2018.8665685>
13. Islam T., Hashem M.M.A. A big data management system for providing real time services using fog infrastructure. *Proc. 2018 IEEE Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE)*, 2018, pp. 85–89. <https://doi.org/10.1109/ISCAIE.2018.8405449>
14. Essl A., Ortner A., Haas R., Hettegger P. Machine learning analysis for a flexibility energy approach towards renewable energy integration with dynamic forecasting of electricity balancing power. *Proc. 14<sup>th</sup>*

- International Conference on the European Energy Market (EEM), 2017. P. 7981877. <https://doi.org/10.1109/EEM.2017.7981877>
15. Cai Y., Starly B., Cohen P., Lee Y.-S. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing // *Procedia Manufacturing*. 2017. V. 10. P. 1031–1042. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.094>
  16. Грачев В.А., Шведенко В.Н., Шведенко В.В., Терская Н.А. Устройство универсального хранилища данных и способ его формирования. Патент RU2670842. Бюл. 2018. № 30.
  17. Грачев В.А., Шведенко В.Н., Шведенко В.В., Терская Н.А. Способ создания топологии метамодели информационного пространства предметной области и система для его реализации. Патент RU2705456. Бюл. 2019. № 31.
  18. Грачев В.А., Шведенко В.Н., Шведенко В.В., Терская Н.А. Способ агрегирования и преобразования данных и устройство для его реализации. Патент RU2688229. Бюл. 2019. № 15.
  19. Грачев В.А., Шведенко В.Н., Шведенко В.В., Терская Н.А. Способ создания информационного обеспечения информационно-управляющей системы на основе инвариантных информационных структур. Патент RU2697922. Бюл. 2019. № 24.

#### Авторы

**Шведенко Владимир Николаевич** — доктор технических наук, профессор, ведущий специалист, Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук (ВИНИТИ РАН), Москва, 125190, Российская Федерация, [sc 6601961956](https://orcid.org/0000-0002-3223-4982), <https://orcid.org/0000-0002-3223-4982>, [vv\\_shved@mail.ru](mailto:vv_shved@mail.ru)

**Мозохин Андрей Евгеньевич** — кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, Филиал ПАО «МРСК Центра» — «Костромаэнерго», Кострома, 156961, Российская Федерация, [sc 57220587990](https://orcid.org/0000-0003-4673-8425), <https://orcid.org/0000-0003-4673-8425>, [mozokhin@mail.ru](mailto:mozokhin@mail.ru)

*Статья поступила в редакцию 18.05.2021*  
*Одобрена после рецензирования 02.09.2021*  
*Принята к печати 28.09.2021*

#### Authors

**Vladimir N. Shvedenko** — D.Sc., Professor, Leading Researcher, All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125190, Russian Federation, [sc 6601961956](https://orcid.org/0000-0002-3223-4982), <https://orcid.org/0000-0002-3223-4982>, [vv\\_shved@mail.ru](mailto:vv_shved@mail.ru)

**Andrey E. Mozokhin** — PhD, Deputy Head of Department, IDGC Branch of Centre — Kostromaenergo, Kostroma, 156961, Russian Federation, [sc 57220587990](https://orcid.org/0000-0003-4673-8425), <https://orcid.org/0000-0003-4673-8425>, [mozokhin@mail.ru](mailto:mozokhin@mail.ru)

*Received 18.05.2021*  
*Approved after reviewing 02.09.2021*  
*Accepted 28.09.2021*



Работа доступна по лицензии  
 Creative Commons  
 «Attribution-NonCommercial»