

Обзор международных исследований по цифровизации энергетического сектора

Дирекция по инновациям ФГБУ «РЭА» Минэнерго России

1. Введение

Данный обзор представляет собой систематизацию ряда исследований, посвященных влиянию цифровизации на энергетический сектор. Рассматриваемому вопросу посвящено немалое количество аналитических работ [1-20], в большей или меньшей степени комплексно рассматривающих особенности влияния цифровизации на энергетику. Наиболее полно тема раскрыта в работах [1-6].

В первую очередь следует уточнить, что понимается под цифровизацией в контексте настоящего обзора.

Цифровизация — это процесс перехода к цифровому бизнесу, использующему цифровые технологии для изменения бизнес-моделей, обеспечения новых источников доходов и возможностей создания стоимости [1].

Цифровизация охватывает целый ряд цифровых технологий, концепций и тенденций, таких как искусственный интеллект, «Интернет вещей» (IoT) и Четвертая промышленная революция. Цифровизация может рассматриваться как возрастающее взаимодействие и сближение между цифровым и физическим мирами [3].

В настоящее время процесс цифровизации совпал с происходящей в мировой энергетике трансформацией, основные причины которой рассмотрены в следующем разделе.

2. Причины энергетической трансформации

Энергетическая трансформация, происходящая в настоящее время, в той или иной степени затрагивает электроэнергетические системы большинства государств мира. Можно выделить несколько основных причин данного процесса.

Интенсивное развитие возобновляемой энергетики

Возобновляемая энергетика, в первую очередь солнечная и ветровая, интенсивно развиваются с начала нынешнего столетия.

Например, по данным Глобального совета по ветроэнергетике (Global Wind Energy Council, GWEC) в 2018 году в мире было установлено 51,3 тыс. МВт ветроустановок мегаваттного класса, а суммарная мощность к концу года превысила 591 тыс. МВт. В пятерку стран с наибольшей установленной мощностью ветроэлектростанций входят Китай (211,4 тыс. МВт), США (96,7 тыс. МВт), Германия (59,6 тыс. МВт), Индия (35,1 тыс. МВт) и Испания (23,5 тыс. МВт) [21].

Согласно последним данным компании Wood Mackenzie Power & Renewables и Ассоциации солнечной энергетики (Solar Energy Industries Association, SEIA), весной 2019 года в США преодолена отметка в 2 млн. солнечных электростанций. Аналитики Wood Mackenzie ожидают, что США преодолечат отметку в 3 млн. в 2021 году и 4 млн. уже в 2023 году.

Потребители становятся также и производителями электроэнергии (Prosumer). Например, Германию в перспективе ожидает увеличение количества локальных производителей, присоединенных к общей сети, примерно в 4 раза (при том, что уже сегодня каждый 20-й потребитель выдает электричество в сеть). А в США уже 29 штатов из 50 приняли

обязательные стандарты портфелей возобновляемой энергетики (Renewable Portfolio Standards, RPS) [22].

При этом общеизвестно, что ветряные и солнечные электростанции являются нестабильными с точки зрения вырабатываемой мощности вследствие зависимости от погодных условий и времени суток.

Во Франции в различные периоды года доступность ветроэнергетических мощностей меняется в диапазоне от 1% до 60% от установленной мощности. В Калифорнии (США) снижение мощности, вырабатываемой ветряными и солнечными электростанциями, может достигать 15 тыс. МВт всего за пару часов, зачастую в период пикового потребления [22].

Децентрализация

В традиционных энергосистемах производство электроэнергии осуществляется относительно небольшим количеством крупных источников (тепловые, атомные и гидроэлектростанции), от которых энергия передается и распределяется по сетям большому количеству потребителей.

При развитии возобновляемой энергетики количество генерирующих источников возрастает в геометрической прогрессии. Например, в странах Западной и Южной Европы миллионы индивидуальных жилых домов, на которых установлены фотоэлектрические панели, являются как генераторами (в дневное время при отсутствии облачности), так и потребителями электроэнергии (в периоды пикового потребления, в ночное время при отсутствии аккумуляторов, при неблагоприятных погодных условиях и т. д.).

Кроме того, всё больше появляется локальных энергетических источников (в том числе с комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии), работающих на ископаемом топливе.

Если во времена максимальных продаж газовых турбин высокой мощности четверка крупнейших производителей (General Electric совместно с Alstom, Siemens, Mitsubishi и Ansaldo) выпускали суммарно более 400 турбин в год, то в настоящее время объем заказов не дотягивает и до 100 единиц. Данное обстоятельство уже привело к тому, что компания Siemens всерьез задумалась о судьбе своего соответствующего подразделения.

Интеллектуализация потребления и управление им

Управление потреблением во времени (Demand Response) является важной опцией гибкости электроэнергетического сектора, особенно в совокупности с АМІ. В промышленности это уже является действенным способом снижения затрат на электрическую энергию. Управляемые потребители (к примеру, электромобили, тепловые насосы или холодильники) могут увеличивать потребление в периоды выгодных ценовых предложений. Для этого необходима гибкая система ценообразования, стимулирующая потребителей по возможности отказываться от потребления в периоды высоких цен и увеличивать расход при низких ценах. В случае с жилым сектором для этого необходимы также средства ИТ, такие, как интеллектуальный учет (Smart Metering) и подключенные к интернету бытовые устройства (один из элементов так называемого интернета вещей).

К примеру, высокие температуры в части штатов США летом 2018 года привели к тому, что сетевые и коммунальные предприятия выпустили уведомления об управлении потреблением, пиковых ценах и добровольной экономии [23]. В южной Калифорнии в конце июля системный оператор CAISO (California Independent System Operator) опубликовал обращение ко всем потребителям штата, призывающее к добровольному энергосбережению в течение периода 24 и 25 июля. Данные меры привели к экономии потребления в размере 450 МВт 24 июля и 540 МВт 25 июля, когда CAISO зафиксировал новый рекорд пиковой нагрузки (46,4 тыс. МВт). Компания Southern California Edison (SCE) отдельно призвала абонентов, участвующих в ее летней программе скидок, разрешить коммунальному предприятию управлять своими кондиционерами в течение нескольких часов с 23 по 25 июля и 6-7 августа

в обмен на оплату. По сообщениям компании, в июльском мероприятии приняли участие более 200 тыс. частных и 9 тыс. коммерческих абонентов.

Расширение использования электромобилей

Еще одним фактором, который окажет существенное влияние на развитие электроэнергетических систем в средне- и долгосрочной перспективе, по мнению большинства экспертов, является электромобилизация.

Согласно данным Center of Automotive Management (подразделение высшей школы экономики в г. Bergisch Gladbach, Германия), в 2018-м году в мире реализовано 2,1 млн. новых транспортных средств с электрическим приводом.

Безусловным лидером стал Китай. Как известно, вследствие проблем с загазованностью и выбросами вредных веществ, Китай вводит ограничительные меры по использованию транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания, пересматривает планы развития угольной энергетики и планирует иные мероприятия. Поддержка электромобилей рассматривается здесь в качестве одной из главных мер.

Так, в 2018-м году в Китае продажи электромобилей составили 1,255 млн. единиц (включая 0,2 млн. коммерческих электромобилей), что на 62% больше, чем годом ранее. Характерно, что 75% из новых электромобилей относятся к «чистым» электромобилям категории BEV (Battery Electric Vehicles), а только 25% - к заряжаемым гибридам (PHEV, Plug-in Hybrid Electric Vehicles). Вторым после Китая государством по объемам продаж электромобилей стали Соединенные Штаты Америки, где реализовано 361 тыс. транспортных средств – на 86% больше, чем в 2017-м году. Две из трех новых машин здесь относятся к категории BEV [24].

Тройку лидеров по итогам прошлого года замкнула Норвегия. Учитывая тот факт, что более 96% электрической энергии в этой скандинавской стране вырабатывается гидроэлектростанциями (и еще немногим более 1% составляет доля ветряных станций), не вызывает удивления масштабная поддержка электромобилей. Продажи выросли на 18% и составили 73 тыс. штук (из них 63% – BEV), а доля электромобилей в объеме регистрации новых транспортных средств достигла 49,1%!

Все перечисленные факторы обуславливают трансформацию энергетического сектора, и цифровизация, по мнению аналитиков и исследователей, станет тем инструментом, который позволит эффективно осуществить данный процесс.

3. Исследования, посвященные цифровизации энергетического сектора

Авторами и/или активными участниками подготовки работ, охваченных настоящим обзором, являются:

- *международные организации или их подразделения:*
 - Европейские технологические и инновационные платформы Евросоюза (European Technology & Innovation Platforms, ETIP) [1];
 - Международное энергетическое агентство (International Energy Agency, IEA) [3];
 - Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (International Renewable Energy Agency, IRENA) [6];
 - Аудиторская компания PricewaterhouseCoopers [7];
 - Аудиторская компания Ernst & Young [10];
 - Мировой энергетический совет (World Energy Council, WEC) [15];
- *энергетические ведомства государств:*
 - Энергетическое ведомство Швейцарии (Bundesamt für Energie BFE) [2];
 - Энергетическое ведомство Германии (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) [4, 12];
- *профильные объединения и организации государств:*
 - Объединение организаций энергетики и водоснабжения Германии (BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft) [5, 14, 18];

- Энергетическое агентство Австрии (Austrian Energy Agency) [19];
- компании, фонды, тематические конференции и коллективы исследователей [8, 9, 11, 13, 16, 17, 20].

Как уже отмечено во введении, наиболее комплексное рассмотрение влияния цифровизации на энергетическую отрасль проделано в работах [1-6]. Остальные работы имеют более узкий (региональный либо тематический) охват.

4. Направления и технологии, затрагиваемые цифровизацией

Рассматриваемые в рамках данного обзора исследования выделяют ряд направлений и/или технологий влияния цифровизации на энергетический сектор, а именно:

- в работе [1] три уровня (физический, инфраструктурный и бизнес) включают 10 технологий (см. Таблицу 1);
- в работе [2] представлены 14 направлений цифровизации энергетики (см. Таблицу 2);
- в исследованиях [3] и [4] выделено по 4 направления цифровизации, показанные в Таблицах 3 и 4 соответственно;
- на рис. 1 показана Функциональная схема «цифровизация в энергохозяйстве», сформированная авторами работы [4];
- в работе [5] отмечено 5 основных направлений цифровизации (см. Таблицу 5);
- в исследовании [6] выделены 30 инновационных направлений, 9 из которых непосредственно связаны с технологиями цифровизации:

- 1 - Интеллектуальная зарядка электромобилей;
- 2 - Power-to-Heat;
- 3 - Power-to-Gas;
- 4 - IoT;
- 5 - Искусственный интеллект и Big Data;
- 6 - Блокчейн и одноранговые транзакции;
- 7 - Агрегаторы;
- 8 - Energy as a Service;
- 9 - Прогнозирование выработки возобновляемых источников.

В Таблице 6 представлено видение авторами работы [6] влияния цифровизации на основные этапы функционирования электроэнергетической системы (генерация – передача – распределение – потребление).

Систематизируя все направления и технологии, рассмотренные в исследованиях [1-6], а также в работах [7-20], можно выделить 12 основных групп, перечисленных в Таблице 7. Важно уточнить, что нумерация в данной таблице носит исключительно порядковый характер и не подразумевает приоритетизации.

По отдельным группам следует привести некоторые дополнительные пояснения, остальные подробнее разобраны в следующем разделе на конкретных примерах.

Блокчейн

Тема применения блокчейна в энергетике в настоящее время является одной из самых активно обсуждаемых применительно к задачам цифровизации. На рис. 2 схематично показан принцип работы данной технологии, а в Таблицах 8 и 9 представлены перспективы, а также проблемы и вызовы ее использования, консолидированные по данным различных исследований.

Как видно из Таблицы 8, наиболее перспективными с экономической точки зрения являются варианты использования блокчейна как способа расчета за зарядку электромобиля, а с технической точки зрения - в качестве механизма упрощения и автоматизация процессов.

Интеллектуальный учет и управление потреблением

Потенциал управления потреблением (Demand Response) при наличии интеллектуального учета электрической энергии оценивается в размере от единиц до десятков процентов. В Таблице 10 представлены результаты ряда исследований, проведенных в последние годы в 4 государствах.

Важным в данном случае является также вопрос тарифообразования. Исследования показывают, что динамические переменные тарифы более оптимальны для управления потреблением, чем жесткие переменные тарифы. Например, снижение пиковой нагрузки для ценообразования в реальном времени (RTP), почасовых тарифов (HP) и CPP значительно выше, чем для тарифов TOU.

Объединение секторов

Зависимость возобновляемых источников от погоды (наличие ветра, отсутствие облачности и т.д.) приводит к тому, что в определенные периоды их генерация избыточна и возникает задача аккумулирования вырабатываемой электроэнергии.

Одним из перспективных направлений является концепция, получившая название Power-to-Gas, в основе которой лежит преобразование избыточной электрической энергии посредством электролиза в водород. Далее водород может накапливаться и использоваться самостоятельно (например, для заправки работающего на водороде транспорта) либо в небольшой доле подмешиваться в сети газоснабжения. Помимо этого может осуществляться дальнейшее преобразование водорода с целью получения и использования синтетического метана.

Power-to-Gas является частным случаем общей концепции объединения секторов Power-to-X, представленной в Таблице 11.

Виртуальные электростанции

Под термином «виртуальная электростанция» понимается объединение децентрализованных источников электроэнергии, частично вместе с аккумуляторами и гибкими потребителями в общую систему управления. Источниками, как правило, являются ветроэлектростанции, фотоэлектрические панели, биоэнергетические установки и гидроэлектростанции. Они могут объединяться с аккумуляторами, установками Power-to-Gas и Power-to-Heat (преобразование избыточной электроэнергии в газ или тепловую энергию соответственно), а также иными потребителями, которые имеют возможность гибко регулировать свое потребление во времени. Смысл заключается в компенсации и выравнивании сильных и слабых сторон локальных источников. Виртуальная электростанция может выполнять на рынке роли, аналогичные выполняемым традиционной крупной электростанцией. Чем больше источников входит в виртуальную электростанцию, тем лучше, но при этом также возрастают затраты на обработку данных.

Управление производством и потреблением переходит к цифровым системам. Обмен данными о производстве, состоянии аккумуляторов, потреблении, изменении цен, погодном прогнозировании осуществляется в режиме реального времени.

Цифровой двойник, представляющий собой цифровой профиль ретроспективного и текущего поведения физического объекта или процесса, предназначен для оптимизации эффективности использования данного объекта или процесса. Цифровой двойник основан на обширных измерениях параметров и характеристик в режиме реального времени.

В Таблице 12 представлены данные, которые могут быть включены в цифровой двойник на этапах жизненного цикла устройства.

IoT

Начало IoT принято связывать с появлением меток радиочастотной идентификации (Radio Frequency Identification, RFID). Данная технология, которая позволяет отслеживать, бесконтактно соединять и считывать данные с объектов, сначала использовалась в военной и сельскохозяйственной сферах, а затем в логистической отрасли для отслеживания контейнеров [2]. В начале настоящего столетия данные изделий с метками RFID уже хранились в Интернете, что привело к первому использованию термина «Интернет вещей» (IoT). С тех пор концепция расширилась, и вместе с ней увеличилось число заинтересованных сторон, которые теперь охватывают не только коммерческих игроков, но и органы власти, коммунальные службы, исследовательские и научные круги, а также широкую общественность. Пояснения по IoT приведены в Таблице 13.

5. Примеры

В данном разделе представлены примеры применения рассмотренных выше направлений и технологий цифровизации в различных странах мира. В работе [1] предпринята попытка формирования сводной таблицы примеров, охватывающей различные уровни цифровизации (см. Таблицу 14).

Цифровая энергосистема

Первую в мире цифровую энергосистему создает энергокомпания New York Power Authority (NYPA) в США. В декабре 2017 года в Нью-Йорке компания открыла центр iSOC (Integrated Smart Operations Center), осуществляющий мониторинг работы 16 электростанций и 1,4 тыс. миль электрических сетей в режиме реального времени [27].

Центр получает информацию от 24 тыс. сенсоров. Данные обрабатываются при помощи специального программного обеспечения (программа предиктивной аналитики Predix). Кроме того, предприятие сотрудничает с исследовательской организацией Electric Power Research Institute в части разработки дополнительных программных приложений.

Результаты мониторинга и анализа данных выводятся на впечатляющую визуальную стену площадью 81 квадратный фут (более 7,5 м²), установленную на одном из 8 этажей головного офиса компании NYPA.

В течение ближайших пяти лет компания планирует объединить большее количество устройств и систем в единую телекоммуникационную сеть. В центре внимания будет сбор и анализ данных от потребителей, в том числе выработка солнечных батарей, зарядка электромобилей, интеллектуализация зданий и пр. Главной задачей компания видит поддержание стабильного и надежного функционирования сетей при колебаниях производства и потребления.

Цифровой двойник

Предприятие Fingrid, финский оператор системы передачи электроэнергии (TSO), использует цифрового двойника сети передачи электроэнергии для решения задач планирования на средне- и долгосрочную перспективу [28].

Цифровая модель сети – ELVIS (Electric Verkko Information System) – охватывает всю протяженность сетей напряжением 400, 220 и 110 кВ, равную 14,6 тыс. км, а также около 50 тыс. опор и более 100 подстанций. Разработку модели, используемой с 2016 года, предприятие Fingrid осуществляло вместе с энергетической компанией Siemens.

В настоящее время Fingrid занимается созданием хаба данных для консолидации информации, собираемой от интеллектуальных приборов учета электроэнергии со всей Финляндии. Эти данные будут использоваться для повышения точности и достоверности планов и прогнозов, получаемых при помощи ELVIS.

Компания ABB применяет цифрового двойника для моделирования условий безопасного функционирования силовых трансформаторов [29].

Услуги, новые виды бизнеса

Компания Veegy GmbH, совместное предприятие немецких компаний MVV Energie (энергоснабжение), BayWa (торговля и услуги), GreenCom Networks (разработка ПО) и ирландского предприятия Glen Dimplex (производство систем отопления и охлаждения) предлагает услугу для управления такими локальными возобновляемыми энергетическими источниками, как солнечные панели [30]. Панель становится «обучаемой» и помогает собственнику оптимизировать собственное потребление электрической энергии с помощью специального веб-приложения. Приложение дает возможность выбора алгоритма потребления с учетом прогнозирования выработки панели и расхода электроэнергии собственными энергопотребляющими устройствами.

Энергоснабжающие предприятия немецких городов Peine, Eutin и Spreyer создали для своих абонентов (как предприятий, так и частных потребителей) виртуальный торговый центр, предлагающий услуги не только самих энергокомпаний, но и еще 180 зарегистрированных на онлайн-площадке предприятий [31]. В качестве услуг предлагается и повышение энергетической эффективности, и системы интеллектуального управления, и инновации в сфере информационных технологий, и различные сопутствующие товары – в общей сложности более 100 разнообразных предложений.

Smart Grid

Проект GOFLEX, реализовываемый на Кипре, в Швейцарии и Германии, направлен на демонстрацию возможностей технологий интеллектуальных сетей для управления гибкостью производства и потребления электроэнергии [1]. Средствами гибкого потребления являются тепловые (отопление/охлаждение) и электрические (аккумуляирование и заряд/разряд электромобилей) устройства. Основу системы составляет цифровая платформа, позволяющая производить оценку и прогнозирование данных, необходимых для принятия решений участникам проекта.

В швейцарском кантоне Тюргау реализуется концепция интеллектуального кантона («Smarter Thurgau») [32]. Восемнадцать представителей региональной политики и экономики организовали объединение с указанным наименованием. Целью объединения является координация различных секторов региональной экономики при помощи средств цифровизации. Активную роль играет кантональное энергоснабжающее предприятие ЕКТ АГ.

«Smarter Thurgau» представляет собой мультисервисную платформу, объединяющую население и предприятия региона. Компания ЕКТ АГ в числе прочих задач обеспечивает прокладку оптоволоконной сети и функционирования ЦОД.

При реализации проекта создатели объединения выделили четыре ключевых направления: энергетика, образование, безопасность, экономика. В правление объединения вошли два представителя компании ЕКТ АГ.

Пул, виртуальная электростанция

Кёльнская компания Next Kraftwerke использует цифровую систему управления, позволяющую объединять большое количество децентрализованных малых источников для участия в рынке резервной (или регулирующей) электроэнергии, необходимой для компенсации резких изменений нагрузок сети [6, 30]. Минимальная мощность для участия в этом рынке составляет 5 МВт. Next Kraftwerke объединяет в пул (получивший название «Next-Pool») производителей мощностью от 100 кВт (DER, Power-to-Gas, Power-to-Heat, установки комбинированной выработки, аккумуляторные батареи). Каждая установка связана с центральным диспетчерским центром посредством сети GPRS. Всего в пул входят 5,14 тыс. установок общей мощностью 4,032 тыс. МВт, расположенные в Германии и Бельгии.

Другой пример виртуальной электростанции – созданный швейцарской энергетической компанией Centralschweizerische Kraftwerke AG (СКВ) виртуальный энергетический пул (Energiepool). Данное объединение включает более 60 производителей электрической энергии (ГЭС, ГАЭС, станции комбинированной выработки, мусоросжигающие заводы, ветряные и солнечные электростанции) общей мощностью около 1,1 тыс. МВт [33].

Цифровая подстанция

Цифровизация подстанций основывается на шести ключевых аспектах [34]:

- 1) выполнение стандарта МЭК 61850;
- 2) цифровизация процессов;
- 3) обеспечение кибербезопасности на комплексном уровне;
- 4) цифровое управление активами;

5) повышение эффективности функционирования сетей с использованием, например, системы WAMS;

6) комплексная инженерно-техническая программа – интеграция данных в процессе всего жизненного цикла подстанции (от проектирования до эксплуатации).

Активное внедрение технологии цифровых подстанций осуществляют сетевые операторы Fingrid (Финляндия), Statnett SF (Норвегия), National Grid (Великобритания), RTE (Франция), Power Grid (Индия).

Например, компания Statnett SF совместно с предприятием Sprecher Automation GmbH осуществляет пилотный проект на подстанции 300 кВ, используя шину обработки данных [35]. Шведско-швейцарский энергетический концерн ABB реализовывает проект цифровой подстанции в Беларуси совместно с электросетевым оператором «Могилевэнерго» [36].

Ремонт и техническое обслуживание

В декабре 2015 года гидроэлектростанция Pont Baldy, эксплуатируемая компанией Energie Développement Services du Briançonnais (EDSB) на юго-востоке Франции, была подключена к системе мониторинга состояния нового поколения компании GE (Condition Monitoring Systems, CMS), которая называется iCMS [37]. Система удаленно собирает данные в режиме реального времени, которые анализируются для улучшения диагностики и прогнозирования неисправностей.

iCMS собирает и анализирует почти 2 терабайта необработанных данных в месяц, которые объединяются с ранее собранными данными за 3 года. Благодаря анализу и использованию прогностических моделей, ошибки при проведении технического обслуживания могут быть затем автоматически идентифицированы с помощью человеко-машинного интерфейса (Human Machine Interface, HMI), который дает рекомендации в части диагностики.

Например, на станции Pont Baldy возникли проблемы с подшипником (перегрев). Система iCMS диагностировала причину и пришла к выводу, что никаких действий в данном случае не требуется. В целом iCMS может обеспечить до 1% дополнительной мощности электростанции.

Большие данные, интеллектуальный учет

Немецкая энергетическая компания Innogy совместно с партнерами (к примеру, институт Fraunhofer IMS) реализовывает проект NILM (Nonintrusive Load Monitoring, неинтрузивный мониторинг нагрузки), в рамках которого осуществляет решение задач энергетического менеджмента с помощью обработки больших данных [5]. Информация от интеллектуальных приборов учета, установленных у потребителей, позволяет накапливать и анализировать различные параметры помимо потребляемой мощности. Специализированное программное обеспечение позволяет идентифицировать потенциал снижения энергопотребления.

По данным [6], на конец 2016 года в мире было установлено около 700 млн. интеллектуальных приборов учета, еще 88 млн. введено в работу в 2017 году. По отдельным государствам приведены следующие цифры:

- Китай: 408 млн. (2017 год);
- США: 78,9 млн. (2017 год);
- Великобритания: 8,61 млн. (2017 год);
- Финляндия: 3,4 млн. (2016 год).

В Швейцарии система GridSense управляет энергетической эффективностью зданий при помощи самообучаемого алгоритма с использованием больших данных [2]. Управление установленными в здании тепловым насосом, бойлером, зарядной станцией для электромобиля, аккумуляторными батареями и энергопотребляющими установками направлено на решение задач оптимизации энергетических затрат потребителя и снижения нагрузки на распределительную сеть.

Управление потреблением

В июле 2018 года Комиссия по коммунальным предприятиям штата Техас (Public Utility Commission of Texas, PUCT) утвердила план внедрения веб-портала Smart Meter Texas, функционально совместимой информационной системы на веб-основе, которая, помимо прочего, накапливает полученные от интеллектуальных приборов учета данные от розничных потребителей в 15-минутных интервалах времени, а также обеспечивает для заинтересованных сторон безопасный доступ к указанным данным в целях предоставления таких услуг, как повышение энергетической эффективности и Demand Response [23].

Портал Smart Meter Texas совместно обслуживается четырьмя электросетевыми компаниями: AEP Texas, CenterPoint Energy Houston Electric, Oncor Electric Delivery Company и Texas-New Mexico Power Company.

Электромобили

Немецкая компания Energie Calw GmbH развивает услугу каршеринга электромобилей (E-Carsharing) [31]. При помощи мобильного приложения осуществляется информирование пользователей в числе прочего о процессе зарядке аккумуляторных батарей. Собственная сеть зарядных станций компании в 2018 году была расширена до 50 точек.

Швейцарское энергетическое (Bundesamt für Energie, BFE) и топографическое (Bundesamt für Landestopografie, swisstopo) ведомства в сотрудничестве с собственниками электростанций создают национальную цифровую базу данных по зарядной инфраструктуре для электромобилей (Dateninfrastruktur Elektromobilität, DIEMO) [2]. База данных будет использоваться в том числе для мультимодальных платформ мобильности.

В Испании интеграция электромобилей с помощью средств цифровизации осуществляется посредством центра управления электромобилями (Control Centre for Electric Vehicle, SECOSVEL) [1]. SECOSVEL включает программное обеспечение, позволяющее испанским TSO в режиме реального времени осуществлять мониторинг работы электростанций, оценку степени использования электромобилей, анализ накапливаемых больших данных для прогнозирования потребления.

Коммуникационная инфраструктура

Энергоснабжающая компания Energieversorgung Mittelrhein (EVM-Gruppe) совместно с предприятием Thüga реализовывает пилотный проект по передаче данных с использованием сети LoRaWAN в немецком городе Кобленц.

Данные от расположенных в различных местах сенсоров передаются и обрабатываются в режиме реального времени. Информация о состоянии электрических сетей, наличии свободных мест на парковочных площадках, заполнении мусорных контейнеров и пр. позволяет предприятию повышать эффективность своей деятельности.

API

Швейцарское энергетическое ведомство создало портал (sonnendach.ch), на котором любой желающий может узнать потенциал выработки электроэнергии при установке фотоэлектрических панелей или тепловой энергии при установке солнечных коллекторов на крыши или фасады домов во всех регионах страны [2].

Цифровая станция

Австрийская энергетическая компания VERBUND Hydro Power GmbH (VHP) в рамках комплексного проекта «Цифровое будущее» (Digital Future) совместно с Техническим университетом г. Грац реализовывает два обусловленных цифровизацией пилотных проекта [38]:

- цифровая гидроэлектростанция (Digital Hydro Power Plant);
- цифровое управление персоналом (Digital Workforce-Management).

В качестве объекта для реализации первого пилотного проекта выбрана австрийская ГЭС Rabenstein. Обработка данных, получаемых от большого числа установленных датчиков, наряду с использованием цифрового двойника станции позволяют прогнозировать выход из строя важных компонентов.

Первые результаты проекта представлены в апреле 2019 года в рамках производственной конференции европейского объединения электростанций VGB PowerTech.

Второй пилотный проект охватывает пять стадий управления персоналом: подготовка работ; оперативно-производственное планирование; организация и распределение работ; выдача заданий на проведение работ и оформление работ.

В гидроэнергетическом комплексе Сальто Гранде на реке Уругвай, в двухстороннем проекте, осуществляемом правительствами Аргентины и Уругвая, в рамках программы непрерывной модернизации внедряются цифровые системы управления с целью адаптации к новым условиям, таким как увеличение доли RES в балансе электроэнергии [48]. Многолетняя программа цифровизации направлена на повышение эффективности за счет большей интеграции между эксплуатацией и техническим обслуживанием. Следующие этапы реализации программы будут включать повышение уровня кибербезопасности и дальнейшую оптимизацию производительности посредством интеграции диспетчеризации, генерации и управления водными ресурсами.

На Пиренейском полуострове компания EDP Portugal формирует новую платформу управления 56 гидроагрегатами, которая расширит стандартный рабочий диапазон турбин и будет использовать прогнозную аналитику и расширенное моделирование производительности [48]. Компания EDP тесно сотрудничает с концерном GE в части внедрения новых интеллектуальных систем мониторинга на 12 гидроэлектростанциях. Кроме того, программа EDP по цифровизации будет охватывать пилотную программу оптимизации активов.

В Таблице 15 представлена концепция цифровой ГЭС.

Предупреждения и отключения неплательщиков

Ежегодно примерно 30 nsc/ абонентов энергоснабжающей компании GASAG (Германия) получают предупреждения об отключении электроэнергии в связи с неоплатой. Для оптимизации данных процессов (уведомление, предупреждение, отключение) как с точки зрения компании, так и с позиции должников (в части возможного предотвращения отключения) предприятие разработало и применяет прогнозную расчетную модель с применением алгоритмов предиктивной аналитики [5].

IoT

По данным компании Parks Associates (США), обнародованным на конференции Smart Energy Summit (18-20 февраля 2019 года, г. Остин), в 2019 году 23% американских домохозяйств, имеющих широкополосное подключение к сети Интернет, планируют покупку интеллектуальных термостатов (Smart Thermostat) и интеллектуальных устройств искусственного освещения. Компания прогнозирует дальнейший существенный рост продаж указанных и иных подключенных к сети устройств, а также связанное с этим интенсивное развитие программных приложений, позволяющих потребителям оптимизировать затраты на расходуемые энергоресурсы.

Дроны

Компания Measure (США) применяет беспилотные летательные аппараты (дроны) в солнечной энергетике для решения следующих задач [39]:

- планирование и подготовка работ на площадке строительства солнечной фотоэлектрической станции;
- приемо-сдаточные испытания;
- инспекция технического обслуживания, проверка поверхности;

- инспекция линий электрической сети.

Значительный объем собираемых и накапливаемых цифровых данных (к примеру, среднее количество только фотографических изображений составляет 800 единиц на 1 МВт мощности) обрабатывается и анализируется при помощи специализированного программного обеспечения.

Швейцарские энергетические компании BKW Energie AG и Alpiq применяют дроны для осуществления инспекций линий электропередачи [2].

Немецкая энергетическая компания Innogy создала подразделение Usair, которое обобщает собранные при помощи дронов по всей Германии результаты инспекционного мониторинга ВИЭ. По оценкам компании, более 80% установленных в Германии солнечных панелей имеют повреждения либо загрязненную поверхность, что снижает их выработку. Термографическое наблюдение позволяет повысить эффективность устранения этой проблемы.

Внешняя инспекция ветроустановки специально обученным персоналом занимает, как правило, от 3 до 4 часов. Дрон выполняет данную работу всего за час. С начала 2017 года компания Innogy применяет данные устройства в оффшорном ветропарке Nordsee Ost. А предприятие Availon GmbH совместно с фирмой Spectair разрабатывает решения по инспекции лопастей роторов ветроустановок с использованием дронов, оснащенных ультразвуковой аппаратурой [40].

Компания SkySpecs разработала дрон, с помощью которого осуществила проверки 54 ветропарков с апреля 2017 года. В общей сложности сделано почти 750 тыс. снимков. Программное обеспечение определяет, когда и где проводить фотосъемку.

Беспилотники SkySpecs осматривают лопасти ветряных турбин, выявляют дефекты и повреждения от погодных условий и износа. В перспективе компания планирует отслеживать состояние выявленных повреждений в динамике, производя осмотр ветроустановок год спустя (или чаще при необходимости). Сопоставление результатов мониторинга за несколько лет позволит получить представление о влиянии состояния лопастей на показатели функционирования установок.

Повышение энергоэффективности

Здание в Амстердаме, оснащенное сетью PoE и интеллектуальным светодиодным освещением с датчиками освещенности в помещениях, позволяет эксплуатирующей здание организации обрабатывать и анализировать большой объем данных (присутствие людей, график использования освещения и электроприборов и пр.). На основании этой информации осуществляется оптимизация расхода электроэнергии [3].

Китайский национальный институт стандартизации (China National Institute of Standardization) представил в 2016 году маркировку энергоэффективности 16 типов энергопотребляющих устройств, содержащую QR код [3]. По результатам предшествовавшего данному событию анализа выяснилось, что традиционные (нецифровые) энергетические маркировки товаров не приносят желаемого эффекта в части побуждения потребителей к приобретению более эффективных устройств. QR код позволяет пользователю посредством специального приложения на смартфоне оперативно узнать подробную информацию о характеристиках и особенностях устройства.

Интеграция DER

Энергоснабжающая компания Austin Energy (США) уже в 2015 году обеспечивала 20% потребления электроэнергии при помощи DER, в 2016 году доля составила 30%, а к 2027 году она должна увеличиться до 65%. В данном случае речь идет о солнечных электростанциях, установленных как у потребителей, так и у самой компании.

Для интеграции DER в общую систему компания реализовывает проект SHINES (Sustainable and Holistic Integration of Energy Storage and Solar, устойчивая и комплексная интеграция солнечных электростанций и накопителей энергии) [41]. Проект включает создание системы управления распределенными энергоресурсами (DERMS, Distributed Energy

Resource Management System) как единой платформы. Одной из важнейших задач является сбор, накопление и анализ данных (в т.ч. погодного прогнозирования, рыночных цен, изменения нагрузки и пр.) в режиме реального времени. Решение этой задачи осуществляется совместно с компанией Doosan GridTech.

Тепло

Немецкая газоснабжающая компания PFALZGAS GmbH в сотрудничестве с институтом Fraunhofer Ifam разработала так называемый цифровой атлас теплоснабжения зданий [5]. На основании сведений о характеристиках домов и накопленных данных об их теплоснабжении составлена карта на каждое здание (доступная также для собственников в формате pdf и jpg), после чего сведения занесены в геоинформационную систему (ГИС) компании Pfalzwerke Netz AG.

В настоящее время осуществляется ежегодная актуализация данных. Цифровой атлас применяется при решении различных задач, в том числе проведении ремонтных работ, реализации мероприятий по повышению энергоэффективности и пр.

Канадская компания Ecobee устанавливает интеллектуальные термостаты в зданиях, функционирование которых осуществляется с учетом информации о присутствии людей, влажности воздуха и температуры окружающей среды. Анализ данных от более 70 тысяч термостатов, имеющих беспроводное подключение к сети интернет, производится с применением методов Искусственного интеллекта. В данной работе участвует команда, сформированная из специалистов двух университетов (University of Toronto и University of Carleton).

Продвигаемые компанией Google интеллектуальные термостаты NEST благодаря применению технологии машинного обучения (в т.ч. усиленное обучение - Reinforced learning) являются обучаемыми, что позволяет оптимально регулировать температуру и снижать расходы на отопление [2]. Данные от установленных в помещении сенсоров формируют обучающие примеры, на основании которых осуществляется обучение термостатов.

При этом группа исследователей кибербезопасности, включающая специалистов из университета Центральной Флориды (США), смогли хакерским способом «взломать» термостат NEST в течение 15 секунд и вывести на экран сообщение следующего содержания: «Я знаю, что вы планировали отключить меня, но боюсь, что не могу позволить сделать это». Впоследствии компания Google вносила изменения в программное обеспечение термостата и всей линейки изделий NEST [42]. Указанное обстоятельство служит также примером важности аспектов кибербезопасности.

P2P, блокчейн

P2P-трейдинг позволяет улучшать интеграцию возрастающего количества DER. В ряде государств осуществляется реализация пилотных проектов по внедрению одноранговых схем торговли электроэнергией, а именно [6]:

- Бангладеш (SOLShare);
- Германия (Lumenaza, sonnenCommunity);
- Нидерланды (Vandebron, Powerspeers);
- Великобритания (Piclo – Open Utility);
- США (TransActive Grid).

Германия, Нидерланды и США являются лидерами по количеству проектов внедрения механизма блокчейн в энергетическом секторе.

Упомянутый выше проект sonnenCommunity реализуется с 2016 года в немецкой Федеральной земле Бавария [19]. Проект включает три элемента: DER, аккумуляторы, а также цифровое объединение всех участников. К устройствам DER в данном случае относятся малые ветроэлектростанции, фотоэлектрические панели и биогазовые установки.

Другой проект реализуется в Нью-Йорке компаниями LO3 Energy, Siemens Digital Grid и Next47. Объединенные в микросеть потребители (некоторые из них также и производители)

электрической энергии осуществляют взаиморасчеты за вырабатываемую солнечными батареями энергию посредством платформы блокчейн [43].

Дополнительным мотивом для потребителей является потенциальная защита от длительных отключений электроэнергии вследствие ураганов (как это произошло в 2012 году при прохождении урагана Sandy), когда микросеть функционирует в полностью автономном режиме.

Проект, получивший названия Brooklyn Microgrid и TransActive Grid, реализуется в нью-йоркском районе Бруклин. На нескольких домах в квартале Park Slope, один из которых построен еще в 1900 году, установка солнечных панелей началась в 2010 году.

В 2016 году жители домов, не имеющие собственных источников электрической энергии, получили возможность оплачивать вырабатываемую солнечными панелями соседей энергию, осуществляя оплату при помощи технологии блокчейн.

Основанная в 2017 году международная организация EWF (Energy Web Foundation) объединяет уже более 100 энергетических компаний со всего мира, участвующих в создании экосистемы блокчейн. В объединение входят, например, такие компании, как:

- EnBW (Германия);
- Total (Франция);
- State Grid EV Service Co. (Китай), дочернее предприятие крупнейшей в мире электросетевой компании State Grid Corporation of China.

Energy as a Service

Энергия как услуга является механизмом перехода от продажи кВт·ч к продаже таких услуг потребителям (behind-the-meter, после прибора учета), как управление потреблением, оптимизация собственной выработки и потребления при наличии локального источника и аккумулятора, обмен энергией посредством локальной сети, энергосбережение и пр.

К лидирующим странам в части внедрения EaaS относятся Австралия, Китай, Финляндия, Ирландия, Италия, Япония, Швеция, Великобритания и США [6].

Software as a Service

Компания Raucatch, дочерняя структура немецкого предприятия BayWa r.e. renewable energy GmbH, продвигает основанное на алгоритмах искусственного интеллекта SaaS-решение DeepSolar. Общая мощность солнечных электростанций, функционирование которых управляется при помощи DeepSolar, превышает 1,5 тыс. МВт.

Управление уличным освещением

В швейцарском городе Delémont реализована инновационная цифровая система управления уличным освещением [44]. Данный город является одним из лучших населенных пунктов Швейцарии в области энергетической эффективности. В рамках реализации проекта «Voie Lactée» произведена установка 1,6 тыс. светодиодных светильников, подключенных к единой сети.

Для управления системой освещения используется программное обеспечение CityTouch новейшего поколения. Благодаря автоматическому сбору информации о параметрах работы светильников появляется возможность не только удаленного управления ими, но и оперативного анализа энергопотребления и соответствующих затрат, а также другой новый функционал.

Кибербезопасность

Швейцарское ведомство по атомной энергетике (Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat, ENSI) проверило соответствие объектов требованиям IT-безопасности Международного агентства по атомной энергетике (International Atomic Energy Agency, IAEA) и стандарту ISO/IEC 27001. По итогам подготовлен собственный документ [2].

Проект по защите интеллектуальных сетей от кибератак (Smart Grid Protection Against Cyber Attacks, SPARKS), получивший поддержку Евросоюза, подразумевает создание цифрового двойника электросетевой инфраструктуры для моделирования потенциально возможного влияния кибератак на DSO [1]. Предполагается, что программа будет использоваться электросетевыми компаниями для модернизации сетевого оборудования.

Закупки

Компании Lausitz Energie Bergbau AG (Leag) и Lausitz Energie Kraftwerke AG будут использовать цифровую платформу для осуществления закупок. Весь процесс отображается в цифровом виде. Leag является крупнейшей восточногерманской энергетической компанией и закупает товары и услуги на сумму более 800 млн. евро ежегодно.

Для запросов о ценах обычно все необходимые документы должны быть распечатаны и частично доставлены по почте на CD-ROM потенциальным поставщикам. Также для окончательного архивирования все соответствующие документы должны быть в бумажном виде. Для исключения «бумажной» составляющей в конце 2018 года компания Leag сформировала команду из трех человек для поиска подходящего цифрового решения.

Платформа начала продуктивно использоваться с начала 2019 года после короткого периода внедрения. Возможности отслеживания текущих тендеров значительно улучшены, а централизованная регистрация стала намного проще. Уже более 170 тендеров проводятся в цифровом формате.

Занятость в энергетике

На основании рассмотренного выше следует также отметить, что влияние цифровизации будет иметь далеко идущие последствия на занятость в энергетической отрасли. Большинство экспертов сходятся во мнении, что наиболее подверженным окажется персонал, выполняющий однотипные рутинные работы. Такая деятельность может относительно просто алгоритмизироваться и автоматизироваться. Кроме этого, существенная часть вспомогательного персонала также может оказаться излишней.

В таблице 16 приведены направления деятельности, востребованность в представителях которых в той или иной степени изменится вследствие цифровизации [49]. Данные получены по результатам опросов представителей экспертного сообщества.

6. Проблемы и открытые вопросы

По мнению большинства аналитиков, основными проблемами и открытыми вопросами цифровизации энергетики являются следующие аспекты (в скобках указаны направления, к которым это относится) [1, 2]:

- Обеспечение доступности данных (Big Data, AI, платформы, API, мультимодальные транспортные системы);
- Защита информации, в том числе персональной (Big Data, AI, платформы, API);
- Развитие соответствующих компетенций, отсутствие достаточного количества специалистов на рынке труда, неготовность персонала (практически все направления);
- Технические аспекты и вопросы практической реализации (практически все направления);
- Готовность потребителей (AI, дроны, объединение секторов);
- Аспекты правовых и финансовых вопросов (хаб данных, кибербезопасность);
- Нормативная база и регуляторные мероприятия (координация энергетических рынков, дроны);
- Возможности злоупотреблений в случае доминирующего положения (платформы, API);
- Стандартизация (платформы, API, кибербезопасность).

Проблемы и вызовы, связанные с применением технологии блокчейн, представлены в Таблице 9.

Отдельную озабоченность вызывает рост собственного потребления энергии устройствами ИТ. В центре дискуссии в настоящее время находится обсуждение вопроса о мероприятиях по снижению потребления энергии центрами обработки данных.

7. Заключение

В данном обзоре представлена систематизация 20 международных и национальных исследований, посвященных актуальной теме влияния цифровизации на энергетическую отрасль, а также значительного количества публикаций, иллюстрирующих практические примеры. Цифровизация может стать ключевым элементом энергетической трансформации.

Все рассмотренные в исследованиях аспекты можно сгруппировать в 12 основных направлений и технологий, представленные в Таблице 7.

Несмотря на наличие проблем, которые предстоит решить, и открытых вопросов, ответы на которые необходимо получить в ближайшем будущем, не вызывает сомнения наличие колоссального потенциала цифровых технологий.

Вполне вероятно, что уже совсем скоро процесс энергоснабжения будет иметь примерно такой вид, как это показано на рис. 3.

Сокращения и некоторые определения [1, 2, 4, 46, 47]

AC (Alternating Current) – Переменный ток

AI (Artificial Intelligence) – Искусственный интеллект

AMI (Advanced Metering Infrastructure) – Инфраструктура интеллектуального учета (получение и обработка данных измерений, дистанционное считывание показаний приборов учета и дистанционное управление)

API (Application Programming Interfaces) – Интерфейс прикладного программирования: протокол, при помощи которого компьютерные программы могут пользоваться функциями и данными других программ

Big Data – Большие данные: способность управлять большими объемами разнородных данных со скоростью, достаточной для их анализа и реагирования в реальном времени; как правило, характеризуются по трем показателям: объему (количество данных), скорости (быстроте обработки данных) и вариативности (количеству различных типов данных)

BIM (Building Information Modelling) – Информационное моделирование зданий: подход к возведению, оснащению, эксплуатации и ремонту здания, предполагающий сбор и комплексную обработку в процессе проектирования всей архитектурно-конструкторской, технологической, экономической и иной информации о здании со всеми её взаимосвязями и зависимостями, когда здание и всё, что имеет к нему отношение, рассматриваются как единый объект

Blockchain – Блокчейн (цепочка блоков): распределенная база данных, у которой устройства хранения данных не подключены к общему серверу

CAPEX (Capital Expenditures) – Капитальные затраты

CPP (Critical-Peak-Pricing) – Тариф по критическому максимальному значению: динамичный регулируемый по времени тариф, основанный на доступности генерации и предельных издержках на производство электроэнергии, объявляемый за короткий период до начала действия (например, анонсируемый накануне)

DC (Direct Current) – Постоянный ток

DEP (Data Exchange Platform), **Datahub** – Платформа обмена данными, хаб данных: центральная платформа, подготавливающая необходимые для участников взаимодействия данные и обеспечивающая обмен этими данными

DER (Distributed Energy Resources) – Распределенные (децентрализованные) энергетические ресурсы: общий термин, объединяющий фотозлектрические системы, ветроэнергетические установки, тепловые насосы, аккумуляторные батареи, электромобили и прочие

DR (Demand Response) – Управление потреблением: услуга, которая стимулирует потребителей сокращать (или смещать во времени) потребление энергии в пиковые периоды, обычно посредством ценового регулирования или стимулирующих платежей

DSO (Distribution System Operator) – Оператор распределительной системы

EMS (Energy Management System) – Система энергетического менеджмента: это система управляемых компьютером инструментов, используемых сетевыми операторами для мониторинга, управления и оптимизации эффективности системы генерации и/или передачи электроэнергии

EV (Electric Vehicle) – Электромобиль

FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) – Гибкая система передачи электроэнергии переменного тока: общий термин, обозначающий группу технологий, которые значительно увеличивают пропускную способность существующей сети - на 50 % и более - при сохранении или улучшении стабильности напряжения и надежности функционирования сети

FLISR (Fault Location Identification and System Restoration) – Локализация, изоляции повреждений и восстановление электроснабжения: один из инструментов автоматизации распределения электроэнергии, направленный на улучшение идентификации повреждений и автоматическое изменение конфигурации сети для уменьшения количества затронутых при аварийных ситуациях потребителей

GPRS (General Packet Radio Service) – Служба пакетной передачи данных через радиоинтерфейс

HP (Hourly-Pricing) – Почасовой тариф: *изменяемый ежечасно тариф*

HVDC (High-Voltage, Direct Current) – Высокое напряжение, постоянный ток

ICT (Information and Communication Technologies) – Информационные и коммуникационные технологии

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) – Профессиональное объединение, международная некоммерческая ассоциация специалистов в области техники

IoT (Internet of Things) – Интернет вещей: *самонастраивающаяся, адаптивная, сложная сеть, которая соединяет «вещи» с Интернетом при помощи стандартных протоколов связи (определение IEEE)*; в т.ч.:

- **IIoT** (Industrial Internet of Things) – Промышленный Интернет вещей

- **NB-IoT** (Narrow Band-Internet of Things) – Узкий диапазон частот - Интернет вещей

KPI (Key Performance Indicator) – Ключевые показатели эффективности

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) – Энергоэффективная сеть с дальним радиусом действия

LPWA (Low Power Wide Area) – Энергоэффективная сеть с дальним радиусом действия

LTE-M (Long Term Evolution - Mobile) – Стандарт «Долгосрочное развитие сетей мобильной связи»

LV (Low Voltage) – Низкое напряжение

Microgrid – Микросеть: *система распределения электроэнергии, содержащая нагрузки и распределенные энергоресурсы (такие как распределенные источники, устройства хранения или управляемые нагрузки), которые могут функционировать либо при подключении к основной сети, либо автономно*

MV (Medium Voltage) – Среднее напряжение

OPEX (Operating Expenses) – Операционные расходы

P2P (Peer-to-Peer) – Одноранговая сеть: *сеть, узлы которой непосредственно обмениваются данными друг с другом без участия центрального сервера*

PLC (Power Line Carrier) – Высокочастотная связь по проводам линии электропередачи

PLM (Product Lifecycle Management) – Управление жизненным циклом

PoE (Power-over-Ethernet) – Использование единого кабеля как для передачи данных, так и для электроснабжения

Predictive Maintenance – Обслуживание по техническому состоянию

PV (Photovoltaic) – Фотоэлектрический

Power-to-X – Преобразование электроэнергии в другие виды энергии и энергоносители: *во-первых, ряд способов преобразования, накопления и реконверсии электроэнергии, которые используют избыточную электроэнергию, обычно в периоды, когда производство возобновляемой энергии превышает нагрузку; во-вторых, относится к технологиям преобразования, позволяющим использовать электроэнергию в других секторах (таких как транспорт или химическая промышленность)*, в т.ч.:

- **Power-to-Chemicals** (Power-to-Products) – Преобразование электроэнергии в химические продукты (цепочка преобразований: электроэнергия → водород → этилен, аммиак и др.)

- **Power-to-Fuel** – Преобразование электроэнергии в моторное топливо

- **Power-to-Gas** – Преобразование электроэнергии в газ (частный случай Power-to-Hydrogen – преобразование электроэнергии в водород)

- **Power-to-Heat** – Преобразование электроэнергии в тепловую энергию

- **Power-to-Liquid** – Преобразование электроэнергии в жидкость

QR Code (Quick Response Code) – Двумерный матричный штрих-код

RES (Renewable Energy Resource) – Возобновляемые энергетические ресурсы: *ресурсы, которые восполняются естественным образом, такие как солнечный свет, ветер, дождь, приливы, волны и геотермальное тепло*

RFID (Radio Frequency Identification) – Радиочастотная идентификация

RTP (Real-Time-Pricing) – Тарификация в режиме реального времени: *тариф без предварительного объявления, при котором цена меняется в режиме реального времени*

Smart Grid – Интеллектуальная сеть: *электрическая сеть, основанная на цифровой технологии, применяемая для снабжения потребителей электроэнергией с использованием двусторонних цифровых коммуникаций*

Smart Pipe – Интеллектуальная труба: *трубопровод, контролируемый средствами интеллектуального управления*

ToU (Time-of-Use-Pricing) – Тариф по времени использования: *жесткий регулируемый по времени тариф, при котором уровни цен устанавливаются заранее, например, тарифы день-ночь (оптимален для ночного включения теплоаккумуляторов)*

TSO (Transmission System Operator) – Оператор системы передачи электроэнергии

UAV (Unmanned aerial vehicle) – Беспилотный летательный аппарат (дрон): *летательный аппарат без пилота – человека на борту*

VPP (Virtual Power Plant) – Виртуальная электростанция: *объединение распределенных источников электроэнергии, накопителей и управляемых потребителей в общую систему*

WAMS (Wide-Area Monitoring System) – Система мониторинга переходных процессов: *технология, позволяющая улучшить ситуативное представление и видимость сетей*

XaaS (Everything as a Service) – Всё как услуга, объединяет следующие сокращения:

- **BPaaS** (Business Process as a Service) – Бизнес-процесс как услуга: *предоставление бизнес-процесса целиком в виде услуги, то есть как программного интерфейса*

- **Daas** (Data as a Service) – Данные как услуга: *модель предоставления и распространения информации, в которой файлы данных (включая текст, изображения, звуки и видео) предоставляются клиентам через сеть, обычно через Интернет*

- **EaaS** (Energy as a Service) – Энергия как услуга: *комплексное управление энергетическим портфелем потребителя, включая энергетические активы, операции и услуги*

- **IaaS** (Infrastructure as a Service) – Инфраструктура как услуга: *инфраструктура, включающая в себя интерфейс управления и связанное с ним программное обеспечение, предоставляемая как облачный сервис*

- **MaaS** (Mobility as a Service) – Мобильность как услуга: *переход от персональных видов транспорта к мобильным решениям, которые используются в качестве услуги*

- **Paas** (Platform as a Service) – Платформа как услуга: *работающий поверх IaaS облачный сервис, при котором абстрагируются вычислительные службы (включая операционное программное обеспечение)*

- **SaaS** (Software as a Service) – Программное обеспечение как услуга: *предоставление компьютерных приложений через Интернет*

ВИЭ – Возобновляемые источники энергии

Интеллектуальный анализ данных: *процесс исследования и анализа больших объемов данных с целью выявления закономерностей*

ИТ-ресурсы – Информационно-технические ресурсы

Облачные вычисления: *вычислительная модель, предоставляющая организациям такие ИТ-ресурсы, как серверы, промежуточное ПО и приложения в виде доступных в режиме самообслуживания сервисов*

Платформа: *инфраструктура, поддерживающая разработку программных продуктов и управление ими*

ПО – Программное обеспечение

Прогностическая аналитика: *решение для статистической обработки или интеллектуального анализа данных, включающее в себя работающие как со структурированными, так и с неструктурированными данными (совместно или отдельно) алгоритмы и методы задач прогнозирования*

ЦОД – Центр обработки данных

Источники информации

- [1]. Digitalization of the Electricity System and Customer Participation, description and recommendations of Technologies, Use Cases and Cybersecurity. Technical Position Paper WG4. European Technology & Innovation Platforms (ETIPs). September 2018.
- [2]. Digitalisierung im Energiesektor. Dialogpapier zum Transformationsprozess. Bundesamt für Energie BFE. Bericht vom 11. Dezember 2018.
- [3]. Digitalization & Energy. International Energy Agency. 2017.
- [4]. Die Digitalisierung der Energiewende. Agentur für Erneuerbare Energien e.V. Gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. August 2018.
- [5]. Digital EVU. Wo steht die deutsche Energiewirtschaft? A.T. Kearney, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V., IMP³rove. 2018.
- [6]. IRENA (2019), Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [7]. Deutschlands Energieversorger werden digital. PricewaterhouseCoopers. Januar 2016.
- [8]. J. Bartenschlager, C. Beyeler. Erfolgreiches Management der digitalen Transformation. Bulletin 10/2016.
- [9]. Energieversorger 4.0: Studie zur Digitalisierung der Energieversorger. In 5 Schritten zum digitalen Energiemanager. QUANTIC Digital GmbH. Januar 2017.
- [10]. Stadtwerkstudie 2017. Der Verteilnetzbetreiber der Zukunft – Enabler der Energiewende. Ernst & Young GmbH. Wirtschaftsprüfungsgesellschaft. Juni 2017.
- [11]. Chancen und Herausforderungen durch die Digitalisierung der Wirtschaft. Schriftenreihe des Kuratoriums. Band 9. Forum für Zukunftsenergien e.V. Februar 2016.
- [12]. Barometer Digitalisierung der Energiewende. Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Berichtsjahr 2018.
- [13]. Studie zur Digitalisierung der Energiewirtschaft. Becker Büttner Held Consulting. Mai 2017.
- [14]. Die digitale Energiewirtschaft. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. Mai 2016.
- [15]. Digitalisierung in der Energiewirtschaft. Die Nachwuchsorganisation des World Energy Council Austria. Ergebnisse der YEP – Arbeitsgruppe 4/2018.
- [16]. Digitalisierung. factory - Magazin für Nachhaltiges Wirtschaften. 2018. № 1.
- [17]. Capitalizing on the digital revolution. A Zpryme research report. 2018.
- [18]. Digitalisierung aus Kundensicht. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. März 2017.
- [19]. Digitale Transformation der Energiewelt. Ergebnisse einer Umfrage bei österreichischen (Energie-)Unternehmen. Austrian Energy Agency. Mai 2017.
- [20]. J. Riester. Energie 4.0 – Die Digitalisierung der Energiewirtschaft. Eine empirische Untersuchung zur verbraucherseitigen Akzeptanz der Smart Meter Technologie und Implikationen für deren Vermarktung. 2017.
- [21]. Global Wind Report 2018. Global Wind Energy Council. April 2018.
- [22]. A Practical Guide to Digitalization for the Power Industry. White Paper. Siemens. June 2018.
- [23]. 2018 Assessment of Demand Response and Advanced Metering. Staff Report Federal Energy Regulatory Commission. November 2018.
- [24]. E-Mobilität im internationalen Vergleich. Konsolidierte Absatztrends im Gesamtjahr 2018 und Prognose 2019. Center of Automotive Management. Januar 2019.
- [25]. M. Sterner. Notwendigkeit und Chancen für Power-to-X-Technologien. Energiewirtschaftliches Kurzgutachten. PTX-Allianz. Oktober 2017.
- [26]. Fault Location, Isolation, and Service Restoration Technologies Reduce Outage Impact and Duration. U.S. Department of Energy. December 2014.
- [27]. NYPA's ISOc: The Path to a Digital Utility Power Magazin. Vol. 162. №7. July 2018.
- [28]. Finland's double vision: The future of grid planning. Siemens, The Magazine for energy leaders. №17. 2018.

- [29]. M. P. Acharya, m. J. Mousavi. Digitale Zwillinge und Echtzeit-KI in der Edge. ABB Review 2/2019.
- [30]. J. Reinecke. Eine Branche im Aufwind. Zweitausend50 // Das Magazin der Energie und Wasserwirtschaft. 2018. № 2.
- [31]. D. Wehner. Die digitale Revolution an der Basis. Zweitausend50 // Das Magazin der Energie und Wasserwirtschaft. 2018. № 2.
- [32]. R. Möll. Eine Ideendrehzscheibe für smarte Projekte. bulletin.ch 10/2018.
- [33]. Optimale Energie mit virtuellem Pool. ABB ABOUT 2/19.
- [34]. Substations in the digital age. Siemens, The Magazine for energy leaders. №17. 2018.
- [35]. S. Hutterer. Digital Substation: Prozessbus im Einsatz. bulletin.ch 11/2017.
- [36]. ABB to Enable World's Largest Digital Substation in Belarus. T&D World. October 2018.
- [37]. Hydropower's Digital Transformation. GE Renewable Energy. September 2017.
- [38]. C. Freiler, F. Senn, B. Hollauf, D. Schlüsselberger. Digitalisierung in der Wasserkraft. 15. Symposium Energieinnovation, TU Graz, 2018.
- [39]. Drones in Solar. A Measure White Paper. 2019.
- [40]. А.В. Могиленко. Перспективы применения дронов в энергетике и коммунальном хозяйстве. // Энергетика и промышленность России, 2017. №22 (330). 16 с.
- [41]. L. Martin. How to Determine the Right Mix of DER. T&D World. May 2019.
- [42]. K. Maize. The Dark Side of the Smart Grid. Power Magazin. № 5. May 2019.
- [43]. А.В. Могиленко. Блокчейн приходит в электрические сети? // Энергетика и промышленность России, 2017. №10 (318). 21 с.
- [44]. D. Otter. Digitale Betriebsführung. bulletin.ch 11/2018.
- [45]. K. Garrels. Digitaler Zwilling – eine bedeutende Softwarekomponente der Industrie 4.0. ABB Review 4/2018.
- [46]. Д. Гурвиц, А. Ньюджент, Ф. Халпер, М. Кауфман. Просто о больших данных. Москва: Эксмо, 2015.
- [47]. Abschätzung der ökonomischen Folgen der Digitalisierung in der Mobilität. Machbarkeitsstudie. Zuhanden des Bundesamtes für Raumentwicklung. 02.07.2018.
- [48]. Adapting to the new Era of digital Hydropower Design and Operation. Hydropower Status Report 2019. Sector Trends and Insights. The International Hydropower Association (IHA), 2019.
- [49]. Digitalisierung in der Energiewirtschaft. Technologische Trends und ihre Auswirkungen auf Arbeit und Qualifizierung. Hans-Böckler-Stiftung. Mai 2018.

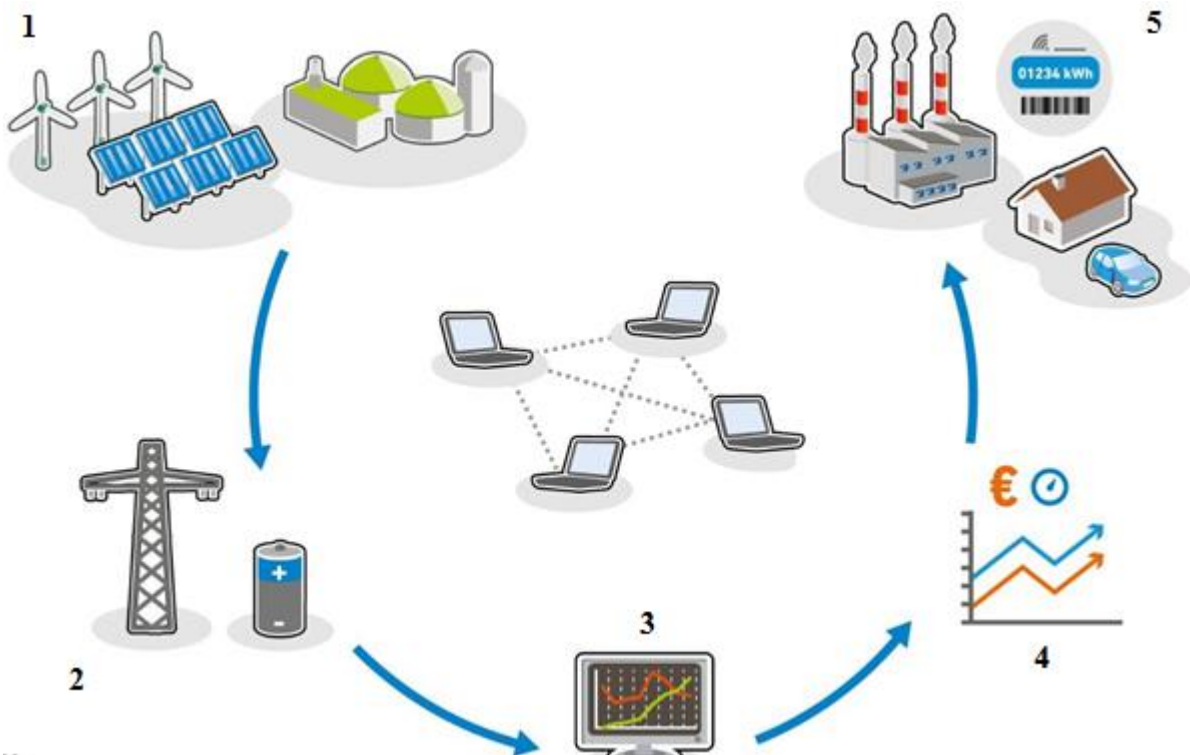


Рис. 1. Функциональная схема «цифровизация в энергохозяйстве» [4]

1 (производство):

- автоматизированное управление многочисленными децентрализованными установками (виртуальные электростанции);
- прогнозирование технического состояния, удаленное обслуживание и мониторинг.

2 (сети):

- данные о производстве и потреблении в реальном времени, автоматизированное регулирование и управление (Smart Grid);
- системные услуги (к примеру, энергия для балансирования) при децентрализации;
- улучшенное прогнозирование погоды;
- оптимальная для сетей зарядка и разрядка аккумуляторов.

3 (торговля):

- виртуальные рыночные площадки и платформы;
- высокочастотная торговля и микротранзакции с автоматизированными денежными расчетами;
- децентрализованная (пиринговая) торговля, к примеру, Mieterstrom (электричество арендаторам – вырабатываемая децентрализованным источником электроэнергия, которую потребляет арендатор данного помещения), Nachbarschaftsmodelle (модель соседства);
- подтверждение происхождения / сертификация.

4 (сбыт):

- гибкие (переменные) тарифы;
- прозрачность данных.

5 (потребление):

- управление потреблением;
- зарядка электромобилей;
- фиксация и передача данных о потреблении в режиме реального времени (Smart Meter);
- интеллектуальное управление домашними бытовыми приборами и отоплением (Smart Home).

Таблица 1

Технологии цифровизации энергетике, рассматриваемые в работе [1]

Уровни (слои)	Технологии	Перспективные применения
Физический <i>Physical layer</i>	<p><i>Сети постоянного тока</i> <i>DC grids</i></p> <p>Развитие силовой электроники, возобновляемой энергетики, электротранспорта приводит к увеличению роли постоянного тока</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Оффшорные ветропарки (передача электроэнергии на постоянном токе до мест присоединения к общей сети) - Зарядка электромобилей, аккумуляторы - Низковольтные сети постоянного тока (пилотные проекты)
	<p><i>Интеллектуальные трансформаторы</i> <i>Smart transformers</i></p> <p>Силовая электроника открывает новые пути трансформации электрической энергии</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Цифровизация подстанций и полный контроль потокораспределения мощности на каждом уровне сети - Возможное физическое разделение регулирования частоты на разных уровнях напряжения и простая реализация схем распределенного управления
	<p><i>Объединение секторов</i> <i>Sector coupling</i></p> <p>Нестабильность выработки электроэнергии возобновляемыми источниками ставит вопрос о необходимости ее преобразования в иные виды энергии в периоды избыточной выработки с возможностью обратного преобразования и/или использования при необходимости</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Power-to-X: объединение электро-, теплоэнергетических секторов с газовым, химическим и транспортным секторами [25] - Применение получаемого газа не только для хранения, но и в качестве газомоторного топлива
Инфраструктурный <i>Infrastructure layer</i>	<p><i>Сети коммуникации</i> <i>Communication networks</i></p> <p>Интеграция коммуникационной инфраструктуры является ключевой частью цифровизации энергетических систем</p>	<p>5G:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Интеллектуальный учет - Телеметрия и управление - Самовосстанавливающиеся сети - Управление распределенной генерацией - Микросети - Интеграция возобновляемых источников - Прогнозирование генерации и потребления - Безопасность
		<p>LPWA, NB-IoT (Narrow Band-Internet of Things), LTE-M, LoRaWAN, Sigfox:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Учет - Мониторинг объектов и окружающей среды - Интеграция инфраструктуры - Интеллектуальные сети с незначительными объемами передачи данных
		<p>Wi-Fi:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Учет - Автоматизация зданий
		<p>Bluetooth:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Метрология - Автоматизация зданий

Продолжение таблицы 1

Уровни (слои)	Технологии	Перспективные применения
Инфраструктурный Infrastructure layer	<p style="text-align: center;"><i>Сети коммуникации</i> <i>Communication networks</i></p> <p>Интеграция коммуникационной инфраструктуры является ключевой частью цифровизации энергетических систем</p>	<p>PLC, в т.ч. Broadband PLC, Narrowband (NB) PLC, PRIME (PowerLine Intelligent Metering Evolution), G3-PLC:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Интеллектуальный учет - Управление и автоматизация <p>Оптоволоконные технологии (Optical Fibre Technology):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Цифровые подстанции - Коммуникации между базовыми подстанциями - Управление децентрализованными источниками <p>Спутниковая связь:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Мониторинг окружающей среды, трубопроводов и оборудования - Коммуникации между подстанциями - Автоматизация буровых установок - Видеонаблюдение
	<p style="text-align: center;"><i>Управление электрическими сетями</i> <i>Power grid operation</i></p> <p>Цифровизация оказывает существенное влияние на архитектуру автоматизации электроэнергетических систем</p>	<p>Распределенные интеллектуальные многоагентные системы, осуществляющие активное управление сетями для решения задач:</p> <ul style="list-style-type: none"> - мониторинга - локализации, изоляции повреждений и восстановления электроснабжения (Fault location identification and system restoration, FLISR) [26] - прогнозирования нагрузки и генерации - управления распределенной генерацией
	<p style="text-align: center;"><i>Цифровой двойник</i> <i>Digital twin</i></p> <p>Цифровая копия устройства или системы позволяет моделировать его функционирование в различных режимах</p>	<p>4 модели возможностей:</p> <ul style="list-style-type: none"> - бизнес-модель - оптимизация диспетчирования, маркетинга и трейдинга - эксплуатационная модель - оптимизация потокораспределения, передачи и распределения электроэнергии, затрат - модель перебоев/переходных процессов - прогнозирование потенциальных аварийных ситуаций, перегрузки оборудования - модель управления активами - повышение эффективности активов, раннее выявление аварийных ситуаций
	<p style="text-align: center;"><i>Беспилотные летательные аппараты</i> <i>Unmanned aerial vehicle, UAV</i></p> <p>Известны также как "дроны", осуществляют наблюдение и сбор данных</p>	<p>Малые (Small UAV) дроны осуществляют инспекцию объектов электрических сетей, большие (Bigger UAV) являются конкурентами вертолетов</p>

Продолжение таблицы 1

Уровни (слои)	Технологии	Перспективные применения
Бизнес Business layer	<p><i>Средства визуализации Visualization Tools</i></p> <p>Средства визуализации больших массивов данных, необходимые для анализа сложных процессов</p>	<ul style="list-style-type: none"> - визуализация временных рядов (мониторинг режимов в реальном времени) - визуализация данных оптимизированного поиска - специальные средства визуализации
	<p><i>Платформы гибких объединений Flexibility aggregation platforms</i></p> <p>Позволяют эффективно интегрировать распределенные источники с потребителями и накопителями энергии</p>	<ul style="list-style-type: none"> - системы энергетического менеджмента - системы управления потреблением (Demand Response System) - виртуальные электростанции и виртуальные накопители (Virtual Power Plant and Virtual Battery)
	<p><i>Анализ данных как услуга SaaS, DaaS</i></p> <p>Возможность предоставления услуг потребителям на основании анализа гигантского объема данных интеллектуального учета электроэнергии</p>	<ul style="list-style-type: none"> - сегментация потребителей - повышение качества прогнозирования нагрузок для оптимизации участия в рынках - предоставление потребителям новых услуг и сервисов - программы управления потреблением - оптимизация процессов функционирования распределенных энергетических источников

Таблица 2

Направления цифровизации энергетики, представленные в работе [2]

№	Направление	Комментарий	Примеры
1	Интернет вещей (Internet of Things – IoT)	<i>Сетевизация устройств как промышленного, так и бытового назначения приведет к появлению новых задач в части управления и контроля, энергетический комплекс будет играть одну из важнейших ролей</i>	Децентрализация производства
			Управление потреблением
			Автоматизация зданий
			Микросети (Microgrid)
			Рынки сервисных энергетических услуг
			Цифровое управление инфраструктурой
			Интеллектуализация электротранспорта
2	Большие данные (Big Data)	<i>Гигантское увеличение объемов данных в энергетическом секторе представляет собой одновременно как серьёзный вызов, так и спектр возможностей; окажет заметное влияние на занятость в отрасли</i>	Мониторинг состояния энергетических объектов
			Данные о производстве и потреблении всех видов энергоносителей
			Данные геоинформационных систем
			Информация об использовании электромобилей
			Метеорологическая информация, прогнозирование
			Мониторинг рыночных цен
3	Машинное обучение (Machine Learning)	<i>Одно из наиболее эффективных и стремительно развивающихся решений задачи обработки все возрастающего объема данных</i>	Интеллектуальный термостат
			Индивидуальные предложения на основе данных интеллектуального учета
			Поддержка энергетических исследований
			Улучшение прогнозирования производства возобновляемых источников
			Мониторинг данных и обработка статистики
4	Интеллектуализация измерения и учета	<i>Возможность расширения спектра услуг, оказываемых потребителям</i>	Цифровое снятие показаний
			Виртуальный накопитель энергии
5	Электронная идентичность	<i>Существенный потенциал упрощения ряда процессов на энергетических рынках</i>	Повышение эффективности энергетических рынков
			Оптимальная обработка данных и упрощение доступа
6	Цифровые платформы (Digital platforms)	<i>Возможность расширения спектра услуг, оказываемых потребителям</i>	Инфраструктура ЦОД
			Облачные сервисы
			Специальные платформы для энергетического сектора

Продолжение таблицы 2

№	Направление	Комментарий	Примеры
7	Хаб данных (Datahub)	<i>Компонент обмена и обработки данных посредством цифровых платформ</i>	Обмен данных через хаб
			Упрощение процесса смены поставщика электроэнергии
8	Цифровая координация	<i>Координация участников энергетических рынков</i>	Координация доступа к данным между участниками рынков
			Гибкость и адресность использования данных
9	Интерфейс прикладного программирования (Application Programming Interfaces)	<i>Ключевой элемент автоматизированного объединения систем управления, сбора и анализа данных</i>	Управление интеллектуальным учетом на основании облачных технологий
			Доступ потребителей к информации по возобновляемым ресурсам
			Доступ потребителей к метеопрогнозам
10	Цифровизация зданий	<i>Строительство современных энергоэффективных объектов недвижимости</i>	Информационное моделирование зданий (Building Information Modeling, BIM)
			Управление по сценариям использования (Use-Case-Management)
11	Мультимодальные транспортные решения	<i>Интеллектуальное объединение различных сегментов транспортной сферы</i>	Разгрузка транспортной инфраструктуры в пиковые периоды
			Снижение энергопотребления транспортным сектором
12	Блокчейн (Blockchain)	<i>Упрощение и расширение интеграции возобновляемых источников энергии и транспортных средств с электроприводом</i>	Интеграция децентрализованных генерирующих источников в энергосистему
			Управление зарядкой электромобилей
			Организация локальных энергетических рынков и сообществ
13	Кибер-безопасность	<i>Безопасное внедрение средств цифровизации</i>	Оценка рисков информационной и технологической безопасности
			Предотвращение хакерских атак
14	Дроны	<i>Оптимизация планирования, строительства и эксплуатации объектов всех секторов энергетической инфраструктуры</i>	Проектирование и строительство инфраструктуры
			Инвентаризация и мониторинг состояния зданий
			Мониторинг погодных условий в районах размещения ветропарков
			Инспекция и обследование трубопроводов, линий электропередачи

Таблица 3

Направления цифровизации энергетики, представленные в работе [3]

№	Направление	Комментарий
1	<i>Интеллектуальное управление потреблением (Smart Demand Response)</i>	В 2014-м году рынок оценивался в 5 млрд. долларов, перспективы увеличения к 2020 году - в 5 раз
2	<i>Интеграция возобновляемых источников энергии</i>	Рост доли ВИЭ в балансе потребует большей межсистемной интеграции с расширением использования цифровых технологий
3	<i>Интеллектуальная зарядка электромобилей (Smart Charging for EVs)</i>	Интеллектуальная зарядка невозможна без цифровой инфраструктуры, она позволит снизить требуемую для EV мощность к 2040 году с 140 до 75 ГВт (при условии, что количество EV составит 150 млн.)
4	<i>Появление маломощных распределенных источников электроэнергии (small-scale distributed electricity resources)</i>	Цифровизация позволит интегрировать источники с помощью таких технологий, как: - блокчейн - микросети - виртуальные электростанции

Таблица 4

Направления цифровизации энергетики, представленные в работе [4]

№	Направление	Комментарий
1	<i>Виртуальные электростанции (Virtual Power Plant)</i>	ВИЭ в комбинации с аккумуляторами при использовании цифровых технологий способны обеспечить надежность электроснабжения
2	<i>Интеллектуальные сети (Smart Grids)</i>	Снизят потребности в строительстве резервных электростанций, расширят возможности по интеграции ВИЭ и уменьшат необходимость их отключения в периоды избыточной генерации
3	<i>Блокчейн</i>	В перспективе представляется возможным создание саморегулируемой, автономной и самобалансируемой энергосистемы с миллионами производителей и потребителей и автоматизацией платежей посредством микротранзакций
4	<i>Интеллектуальное управление потреблением (Smart Demand Response)</i>	Динамические переменные тарифы лучше подходят для управления нагрузкой, чем жесткие переменные тарифы

Таблица 5

Направления цифровизации энергетики, представленные в работе [5]

№	Направление
1	<i>Аналитика больших данных (Big Data Analytics)</i>
2	<i>Платформы и цифровые интерфейсы взаимодействия с клиентами</i>
3	<i>Цифровизация внутренних процессов</i>
4	<i>Инструменты коммуникации рынков и стандартизация</i>
5	<i>IT-архитектура, IT-безопасность и защита данных</i>

Таблица 6

Влияние цифровизации на основные этапы функционирования электроэнергетической системы [6]

	Генерация	Передача	Распределение	Потребление
Текущее состояние цифровизации	Ранний этап	Продвижение	Ранний этап	Ранний этап
Следующий шаг	Модернизация электростанций, автоматизированное управление сетями	Продвинутые алгоритмы оптимизации функционирования	Полная автоматизация и оптимизация	Быстродействующее управление потреблением, виртуальные электростанции
Цифровые приложения	Предупредительное техническое обслуживание			Микросети, одноранговые транзакции
	Прогнозирование выработки RES, трейдинг	Поддержание стабильности и надежности функционирования		Автоматизированное управление потреблением
	Повышение гибкости посредством автоматизированного управления		Управление DER для обеспечения баланса и смещения срока инвестиций в расширение сетей	Энергетическая эффективность

Объединение секторов [25]

Объединение секторов	Технологии	Используемый накопитель энергии	Используемая инфраструктура
Электрическая энергия - Тепловая энергия	Тепловой насос	Аккумулятор тепловой энергии	Электрическая, тепловая
	Power-to-Heat		
	Комбинированная выработка Power-to-Gas(-to-Heat)	Аккумулятор тепловой энергии, хранилище газа	Электрическая, тепловая, газовая
Электрическая энергия - Газ	Power-to-Gas	Хранилище газа	Электрическая, газовая
	Power-to-Gas(-to-Power)	Хранилище газа (виртуально: электрической энергии)	
Электрическая энергия - Транспорт	Power-to-Gas	Хранилище газа	Электрическая, газовая
	Электромобили	Аккумуляторные батареи	Электрическая
	Power-to-Liquid	Топливные емкости	Электрическая, топливная
	Power-to-Fuel	Топливные емкости	Электрическая, газовая, топливная
Электрическая энергия - Химическая промышленность	Power-to-Chemicals (Power-to- Products)	Емкости для хранения сырья, хранилище газа	Электрическая, газовая, химическая
	Power-to-Gas		

Таблица 12

Данные, которые могут быть включены в цифровой двойник на этапах жизненного цикла устройства [45]

	Разработка	Изготовление	Функционирование	Обслуживание
Информация о производственном цикле	Управление жизненным циклом (Product Lifecycle Management, PLM)	PLM	Руководство по эксплуатации	Протокол технического обслуживания
3-D представление	Конструкторские чертежи	Инструкция по изготовлению	Визуализация устройства	Инструкция по проведению технического обслуживания, дополненная реальность
Модель	Прогнозирование режима	Виртуальный ввод в эксплуатацию	Добротность регулирования	Диагностика
Имитационное моделирование	Моделирование конструкции	Программно-аппаратное тестирование	Анализ «что было бы, если...»	Прогнозирование
Информационная модель	Технические характеристики	Производственные характеристики	Эксплуатационные характеристики	Характеристики технического обслуживания
Комплексный анализ			Производственные KPIs	KPIs функционального состояния
Визуализация	Инструменты разработки	Инструменты разработки	Отображение эксплуатационного состояния	Отображение функционального состояния

Сводная таблица примеров, охватывающих различные уровни цифровизации [1]

Наименование	Уровень	Участники	Рынки и регуляторные механизмы
Повышение собственного потребления вследствие цифровизации	Преимущественно бизнес, мониторинг данных	DSO, TSO, PV-генераторы, общественные организации, производители PV, разработчики блокчейн	Рынок собственного потребления PV, децентрализованное/коллективное собственное потребление во Франции (ENEDIS)
Обеспечение гибкости рынков Отказ от инвестиций в модернизацию Ограничение штрафов вследствие аварий и снижение простоев	Инфраструктурный	TSO, DSO, энергоснабжающие предприятия	Германия: EnWG, EEG, StromNEV, BSI
Межотраслевая оптимизация - управление потреблением Объединение секторов - Ebay для энергетики - Ensquare	Инфраструктурный	DSO, газоснабжающие предприятия, PV-генераторы, общественные организации, производители PV, разработчики блокчейн	Нидерланды - рыночные инструменты
Энергетические общины - интересы потребителей	Инфраструктурный и бизнес	DSO, ВИЭ-генераторы и участники	Рынок сервисных услуг
		Аккумуляторы, агрегаторы	Регуляторные инструменты разрабатываются
Демократичность разработок			Инструмент разработок
Мониторинг, визуализация и аналитика для каждой группы участников	Инфраструктурный и бизнес	Производители, генераторы, TSO, DSO, сбыт и агрегаторы, потребители и потребители-генераторы	Полная цепочка добавленной стоимости
Обеспечение гибкости рынков Прозрачность рынков благодаря мониторингу	Физический и бизнес	DSO, агрегаторы, регуляторы	Рынок сервисных услуг, регуляторных инструментов еще нет. Зимний пакет (ноябрь 2016) возложил регулирование частоты на TSO, пока DSO позволено создавать локальные рынки для управления загрузкой
DSO - TSO	Инфраструктурный и бизнес	DSO, TSO, ВИЭ-генераторы и потребители, агрегаторы и регуляторы	Рынок сервисных услуг
Планово-предупредительное техобслуживание и ремонт	Физический и инфраструктурный	DSO	Ориентация на определенный рынок отсутствует, механизмы регулирования применяются к качеству оказываемых DSO услуг
Цифровой двойник	Бизнес	TSO, DSO, регуляторы и пользователи	Регуляторные механизмы применяются к DSO, например KPIs для снижения OPEX
Интеллектуальная зарядка электротранспорта	Физический и инфраструктурный	Управляющие зарядкой, TSO, DSO, регуляторы и конечные пользователи	Поддержка и управление потреблением электромобилей
Расширение возможностей потребителей, их взаимодействие и изменение поведения			Инструменты разрабатываются

Таблица 7

Основные направления и технологии цифровизации, которые окажут наибольшее влияние на процесс энергетической трансформации (по данным работ [1-20])

№	Наименование
1	<i>Блокчейн</i>
2	<i>Дроны</i>
3	<i>Платформы и API</i>
4	<i>Интеллектуальный учет и управление потреблением</i>
5	<i>Объединение секторов</i>
6	<i>Цифровой двойник</i>
7	<i>Интеллектуальные сети и их компоненты</i>
8	<i>Интеграция электромобилей, интеллектуальная зарядка</i>
9	<i>IoT</i>
10	<i>Новые услуги, EaaS</i>
11	<i>Big Data, AI, SaaS, DaaS, анализ данных</i>
12	<i>Пулы, объединения, виртуальные электростанции</i>

Таблица 8

Перспективы технологии блокчейн в электроэнергетике (по разным исследованиям) [4]

Экономические Технические Социальные	PwC (2016)	Stiftung Neue Verantwortung (2017)	Blockchain Research Lab (2017)	Weltenergitrat (2017)	BDEW (2017)	Germanwatch (2018)	Ernst & Young / BET (2018)	FES (2016)	FIE (2018)
Перспективы экспортирования		•							
Предоставление системных услуг малыми производителями		•			•		•		
Способ расчета за зарядку электромобиля	•		•		•	•	•	•	•
Снижение транзакционных издержек	•	•		•	•	•	•	•	•
Рост конкуренции на рынке электроэнергии		•				•			
Возможность вывода на рынок малых объемов (микротранзакции)		•	•	•	•	•	•	•	
Стимулирование оптимизации сетей варьируемыми ценами		•			•		•		
Интеграция возобновляемых источников		•	•	•		•			
Корректировка стандартного графика нагрузки		•							
Данные в режиме реального времени о производстве, потреблении, графике нагрузки и загрузке сетей	•	•	•	•	•	•			
Интеллектуализация ведения баланса		•		•	•				
Упрощение и автоматизация процессов	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Использование возможностей гибкости	•	•	•	•	•	•	•		
Снижение мощности резервирования		•		•	•	•			
Улучшение прогнозирования потребления и производства		•		•	•	•			
Снижение необходимости строительства сетей						•			
Улучшение надежности электроснабжения							•		
Ускорение транзакций без посредника	•		•		•		•		
Улучшение контроля сетей	•		•		•			•	
Прозрачность (подтверждение происхождения / сертификация)	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Безопасность данных				•	•				•
Участие на энергетических рынках / усиление позиций Prosumer (производитель и потребитель в одном лице)	•	•				•	•	•	
Снижение зависимости от энергетических рынков						•			
Гибкость потребителей при выборе тарифов и предложений	•		•		•			•	

Таблица 9

Проблемы и вызовы, возникающие при применении технологии блокчейн в электроэнергетике (по разным исследованиям) [4]

<p>Правовые Экономические Технические Социальные</p>	PwC (2016)	Stiftung Neue Verantwortung (2017)	Blockchain Research Lab (2016)	Weltenergitrat (2017)	BDEW (2017)	Germanwatch (2018)	Ernst & Young / BET (2018)	FES (2016)	FIE (2018)
Роли на рынке (к примеру, ведение баланса)	•	•				•	•	•	
Защита данных (право на «забывчивость»)				•	•	•		•	•
Регулирование ответственности	•			•	•			•	•
Права потребителей (к примеру, в случае ущерба)				•				•	•
Отсутствие стандартов	•						•		•
Отсутствие центральной инстанции в конфликтных ситуациях	•			•	•			•	•
Отрицательное соотношение затраты-выгода (высокие инвестиционные потребности)					•	•			
Монополизация (майнинг, разработчик)					•	•			•
Экономичность микротранзакций					•				
Высокие требования к сети вследствие гибкости и децентрализации	•								
Осуществление управления данными	•					•			•
Малая скорость транзакций		•	•	•	•	•			•
Нелегальные активности (к примеру, хакеры)	•			•	•	•		•	•
Большие и растущие издержки на расчеты					•	•			•
Энерго- и ресурсопотребление	•			•	•	•		•	•
Масштабируемость	•			•		•	•		•
Полная потеря данных при потере доступа	•				•				•
Реализация (техническая)	•		•	•					•
Совместимость (к примеру, различных блокчейнов)				•	•				•
Полная потеря данных при потере доступа	•			•		•			•
Реализация	•							•	
Совместимость (к примеру, различных блокчейнов)	•				•	•			

Таблица 10

Потенциал снижения пиковой нагрузки благодаря гибким тарифам [4]

Страна	Потенциал снижения, %	Тип тарифа
Германия (5 исследований)	1,6-18,6	HP
	3-10	CPP
	30	RTP

США (3 исследования)	2,6-17,5	НР
	9-44	СРР
	0-22	СРР/РТП
Норвегия (1 исследование)	33	НР
Великобритания (1 исследование)	5-10	ToU

Таблица 13

IoT [2]

Оборудование устройства	Аппаратное обеспечение представляет собой однокристалльную систему, включающую процессор, датчики (датчик вибраций, микрофон, радиокompас, камера и т.д.), актуаторы и радиочастотные функции. Датчики собирают данные об окружающей среде устройства.
Программное обеспечение устройства	Программное обеспечение устройства, работающее на его оборудовании, обрабатывает собранные устройством данные и отправляет их в облако по заданной сети связи.
Коммуникации	Сети беспроводной связи (например, сотовая связь, радио, WiFi, Bluetooth, ZigBee, LoRa) обеспечивают передачу данных с высокой пропускной способностью, малым энергопотреблением и низкими затратами.
Платформа облачных вычислений	Удаленный центр обработки данных. Облачные инфраструктуры и платформы могут быть общими для многих приложений IoT. Облако также поддерживает аналитику больших данных.
Облачные приложения	Часть системы, которую конечный пользователь видит и взаимодействует с ней. Такие приложения часто основаны на веб-технологиях и доступны в любое время и в любом месте с разных терминалов (мобильных устройств, планшетов, настольных компьютеров).

Таблица 15

Цифровая гидроэлектростанция [48]

	Данные для информации	Информация для действий	Развитие	
Разработка и строительство	Оцифровка чертежей и карт →	Оптимизация разработки →	Подготовка персонала в виртуальной реальности ↓	Цифровая станция
Эксплуатация	Данные онлайн и информационная система →	Удаленное управление станцией Участие в VPP →	Машинное обучение и AI →	
Техническое обслуживание и ремонт	Системы мониторинга →	Удаленный контроль →	↑ Удаленное обслуживание	

Таблица 16

Востребованность направлений деятельности в энергетике в будущем [49]

Увеличится существенно	Увеличится	Не изменится	Уменьшится	Существенно уменьшится
- Проектная деятельность - Анализ данных	- Информационные технологии	- Строительство	- Инженерные профессии в производстве	- Бухгалтерия - Контроллинг

	<ul style="list-style-type: none"> - Онлайн-маркетинг - Инженерные профессии в сетях - Виды работ в сетях, не требующие высшего образования 		<ul style="list-style-type: none"> - Виды работ в производстве, не требующие высшего образования - Традиционный маркетинг 	<ul style="list-style-type: none"> - Продажи (консультирование) - Управление персоналом
--	--	--	---	---

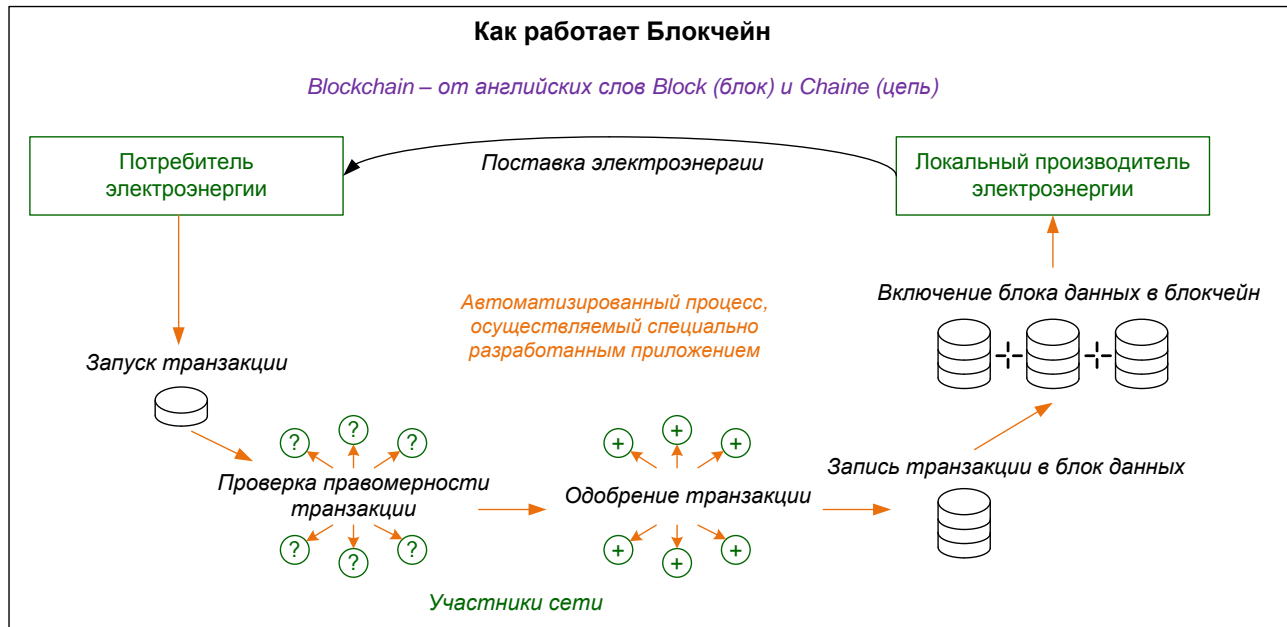


Рис. 2. Блокчейн в электроэнергетике

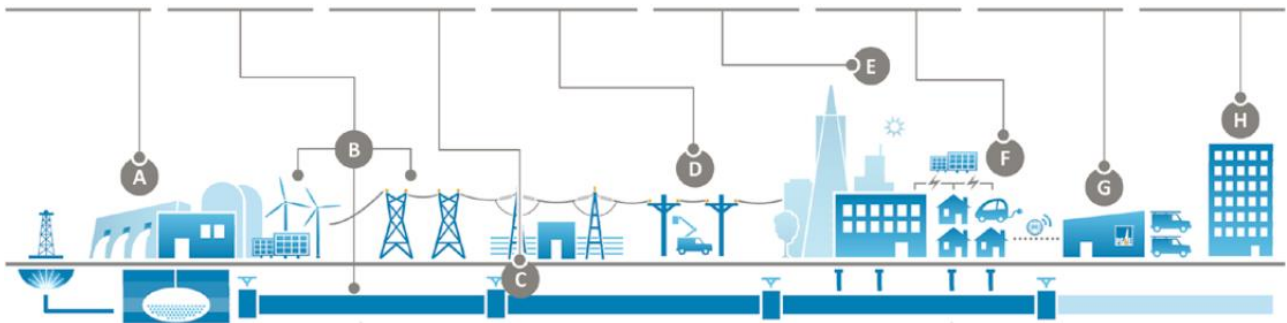


Рис. 3. Цифровое энергоснабжение в будущем [20]

- A – согласование спроса и предложения с учетом обработки больших данных и управления DER*
- B – централизованная база данных дает возможность*
- C – Smart Grids и Smart Pipes*
- D – сотрудники с мобильным доступом к картам, данным и приложениям*
- E – интеграция процессов взаимодействия с потребителями с учетом анализа их перемещений, изменения поведения и персонализированных предложений*
- F – платформа поддержки интеграции DER*
- G – ситуативное управление потреблением*
- H – автоматизация вспомогательных офисов и основанные на анализе данных механизмы поддержки принятия решений*

