

«Зеленая» цифровая трансформация в электроэнергетике

Юлия Туровец

Эксперт, Центр исследований цифровой экономики, yturovecz@hse.ru

Лилиана Прокурякова

Заместитель заведующего, Лаборатория исследований науки и технологий, lproskuryakova@hse.ru

Анна Стародубцева

Стажер-исследователь, Лаборатория исследований науки и технологий, astarodubtseva@hse.ru

Институт статистических исследований и экономики знаний, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (ИСИЭЗ НИУ ВШЭ), 101000, Москва, ул. Мясницкая, 11

Винченцо Бьянко

Доцент, vincenzo.bianco@unige.it

Университет Генуи (Genova University), Италия, Via All'Opera Pia 15/A, 16145 Genova, Italy

Аннотация

Глобальный пандемический кризис поставил под вопрос действенность прежних драйверов экономического роста и подтолкнул к поиску новых оснований устойчивого развития. Послекризисное восстановление пройдет под знаком «зеленой» экономики при ведущей роли топливно-энергетического комплекса. Распространение «зеленых» цифровых технологий и их влияние на электроэнергетику рассмотрены на примере десяти стран — крупнейших энергопроизводителей и потребителей. Теоретической базой исследования стала концепция отраслевых инновационных систем, а методологической основой — изучение научных

и аналитических публикаций. На базе официальной статистики и других надежных и доступных данных проведено сопоставление ключевых показателей «зеленой» цифровизации в электроэнергетике выбранных стран. Сравнительный анализ стратегий развития отрасли позволил выявить ключевые задачи и индикаторы цифровой трансформации для компаний. Определены ключевые направления и три модели «зеленой» цифровизации отрасли на национальном уровне, оценены предпосылки и потенциальные социально-экономические последствия внедрения цифровых технологий в электроэнергетике.

Ключевые слова: цифровые технологии; «зеленые» технологии; топливно-энергетический комплекс; устойчивое развитие; восстановление экономики; интернет энергии; умные сети

Цитирование: Turovets J., Proskuryakova L., Starodubtseva A., Bianco V. (2021) Green Digitalization in the Electric Power Industry. *Foresight and STI Governance*, 15(3), 35–51. DOI: 10.17323/2500-2597.2021.3.35.51

Green Digitalization in the Electric Power Industry

Julia Turovets

Expert, Digital Economics Centre, yturovecz@hse.ru

Liliana Proskuryakova

Deputy Laboratory Head, Laboratory for Science and Technology Studies, lproskuryakova@hse.ru

Anna Starodubtseva

Research Assistant, Laboratory for Science and Technology Studies, astarodubtseva@hse.ru

Institute for Statistical Studies and Economics of Knowledge at the National Research University Higher School of Economics (HSE ISSEK), 11, Myasnitskaya str., Moscow 101000, Russian Federation

Vincenzo Bianco

Associate Professor, vincenzo.bianco@unige.it

Genova University, Via All'Opera Pia 15/A, 16145 Genova, Italy

Abstract

The lasting global economic downturn caused by the COVID-19 pandemic allows decision-makers and societies to re-think the basis and drivers of economic growth, laying the foundation for sustainable development. The green economic recovery takes place with a leading role played by the energy industry. This paper focuses on the application and desired effects of green digital technologies in the electric power industry in ten countries — the largest electricity producers and consumers. The study is designed in the framework of the sectoral innovation systems concept. The research tasks were addressed, first, through horizon scanning (the analysis of

research and analytical publications). Second, the green digitalization indicators for the electric power industry in the selected countries were identified with the use of statistical and other available reliable data and compared. Third, a comparative analysis of national strategic documents was performed, along with corporate tasks and indicators that reflect the digital transformation at micro level. As a result of the study, key trends and three models of green digitalization at the national level were identified, the prerequisites and potential social and economic effects of the application of these technologies in electric power industry were described.

Keywords: digital technologies; green technologies; energy industry; sustainable development; economic recovery; Internet of Energy; smart grid

Citation: Turovets J., Proskuryakova L., Starodubtseva A., Bianco V. (2021) Green Digitalization in the Electric Power Industry. *Foresight and STI Governance*, 15(3), 35–51. DOI: 10.17323/2500-2597.2021.3.35.51

Затяжной спад мировой экономики, вызванный пандемией COVID-19, меняет представление об источниках и драйверах роста, определяющих долгосрочное снижение негативных эффектов для окружающей среды и климата. Начавшаяся еще до пандемии цифровизация различных отраслей в 2020 г. заметно ускорилась и стала ведущим трендом, который способствует увеличению технологической и экономической эффективности, производительности труда, точности планирования, снижению аварийности и стимулирует «зеленый» рост [Midttun, Piccini, 2017; IEA, 2020b; Montevecchi et al., 2020].

Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) играет важную роль в «зеленом» посткризисном восстановлении экономики [Barbier, 2020; Noussan et al., 2021]. С учетом растущего спроса на электроэнергию и специфики развития ТЭК особое значение приобретает электроэнергетика [IEA, 2020a; IRENA, 2019]. За десятилетие 2016–2025 гг. потенциал наращивания добавленной стоимости за счет ее цифровизации оценивается в 1.3 трлн долл. [WEF, 2016]. Как и другие отрасли ТЭК, электроэнергетика находится под воздействием ряда тенденций:

- опережающий прирост генерации и инвестиций в возобновляемые источники энергии (ВИЭ);
- стимулирование энергосбережения и энергоэффективности при положительной динамике спроса на энергоресурсы;
- реконфигурация отношений между производителями и потребителями благодаря умным сетям (*smart grids*) и «интернету энергии» (*Internet of Energy*).

Растущая доля электроэнергии в мировом энергобалансе позволяет оценить перспективы смежных рынков. Благодаря новейшим технологиям, таким как цифровая подстанция, повышается эффективность ее генерации, снижаются потери при передаче, особенно на дальние расстояния, оптимизируются перетоки. Цифровое управление энергопотреблением посредством умных счетчиков снижает нагрузку в пиковые часы и сокращает расходы для разных групп потребителей.

Распространение недорогих, надежных, экологических источников энергии во многих странах связывается с обеспечением энергетически бедных регионов чистым электричеством из местных возобновляемых источников, строительством умных мини- и микросетей¹. Интенсивное внедрение распределенной, автономной и индивидуальной генерации актуально и для России. Многие компании переходят на собственную генерацию — их доля в общей выработке превысила 5% в 2018 г. и продолжает расти темпами около 3% в год² [Минэнерго России, 2019]. Усилению данного тренда способствуют развитие технологий аккумулирования электроэнергии большой мощности, снижение их себестоимости, удешевление крышных солнечных панелей и солнечно-ветровых установок для личного пользования. Возникающие риски для России связаны с плани-

рованием и строительством объектов генерации, особенно с учетом накопленного профицита мощности.

Ключевую роль в глобальном распространении «зеленой» экономики за счет повышения ресурсоэффективности и экспансии чистых источников энергии играют стратегии цифровизации ТЭК, прежде всего электроэнергетики. В литературе пока не сложилось единого представления об этом процессе применительно к традиционным отраслям [OECD, 2019a]. Существующие исследования лишь подчеркивают необходимость комплексного подхода к рассмотрению его особенностей на различных уровнях [IEA, 2017; OECD, 2019b].

Теоретической основой настоящего исследования выступает концепция отраслевых инновационных систем (*sectoral innovation systems*), широко применяемая при изучении технологий в различных секторах [Malerba, 2002]. Рассматриваются ключевые характеристики и эффекты «зеленых» цифровых технологий в сегменте передачи и распределения электроэнергии на национальном и отраслевом уровнях. Проведен сравнительный анализ трансформации отрасли в десяти странах мира, лидирующих по объему производства электроэнергии, — Китае, США, Индии, России, Японии, Канаде, Германии, Бразилии, Южной Корее и Франции. Предложены три модели цифровой трансформации электроэнергетики на национальном уровне, оценены основные эффекты этого процесса.

Направления «зеленой» цифровизации в электроэнергетике

Цифровизация традиционных отраслей экономики — относительно новый вектор исследований с растущим объемом научных и аналитических публикаций [Beier et al., 2017; Müller et al., 2018; Teece, 2018]. Эту тему рассматривают в рамках более широких концепций и феноменов, таких как Индустрия 4.0, умное производство, интернет вещей (ИВ), киберфизические системы, платформенная экономика [Kang et al., 2016; Ghobakhloo, 2018; Kamble et al., 2018]. Эффекты цифровых технологий имеют существенную общеэкономическую, отраслевую и страновую специфику, что связано с инфраструктурным характером отрасли, масштабными экономическими и социальными последствиями, растущим спросом со стороны возникающих секторов, в частности сегмента хранения и обработки данных [Gatto, Drago, 2020; Tripathi, Kaur, 2020]. Развитие электроэнергетики также определяется регуляторными ограничениями, обусловленными глобальными экологическими вызовами [Newberry, 2001; Cavanagh, 2021].

Цифровизация позволяет оптимизировать функционирование и техническое обслуживание сетей энергоснабжения. Появляются новые сервисы, автоматизируется торговля энергией. Энергетические системы, работающие на ВИЭ, децентрализуются [Graf, Jacobsen, 2021; BDEW, 2019]. Получают распространение умные

¹ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/energy/>, дата обращения 28.03.2021.

² <https://minenergo.gov.ru/node/532>, дата обращения 19.02.2021.

(активно-адаптивные) сети и датчики, интернет энергии, виртуальные электростанции (*virtual power plants*), цифровые подстанции, системы распределенного реестра (блокчейн), цифровые платформы [Dellermann et al., 2017; Ketter et al., 2018; Adeyemi et al., 2020; Menzel, Teubner, 2020]. Каждое направление оперирует собственным комплексом технологий [KAS, 2020]. Умные сети интегрируют различные устройства, используемые производителями, поставщиками и потребителями энергии [Ketter et al., 2018; Bertolini et al., 2020]. Их ядром служат умные счетчики, которые в режиме реального времени отслеживают объем потребления и передают данные поставщику для принятия решений об оптимизации инфраструктуры и, следовательно, управления энергопотреблением [Waite et al., 2017; Ketter et al., 2018]. К умным устройствам относят также датчики для контроля качества электроэнергии [Bagdadee et al., 2020] и потерь на линиях электропередач [Song et al., 2017], сенсорного мониторинга подземной инфраструктуры [Rodríguez et al., 2020], автоматизации управления системой [Wertani et al., 2020], мониторинга состояния оборудования [Dileep, 2020] и др.

Широкое применение находят блокчейн-технологии, обеспечивающие защищенную цифровую среду [Carvalho, 2015; Adeyemi et al., 2020; Zhu et al., 2020]. Подобные системы отслеживают операционные процессы, например функционирование устройств, регулирующих напряжение энергосети, выявляют отклонения, предотвращают перебои в снабжении и непредвиденные ситуации [Shahidehpour, Fotuhi-Friuzabad, 2016]. Облегчается взаимодействие между участниками за счет смарт-контрактов, предполагающих безопасные транзакции, управление цифровыми активами (токенами), биллингом, идентификацией и доступом с применением современных алгоритмов шифрования [Andoni et al., 2019; Adeyemi et al., 2020]. В новых сегментах электроэнергетики, в первую очередь ВИЭ, технологии распределенных реестров обеспечивают мониторинг всех звеньев создания стоимости. Потребители получают возможность продавать излишки произведенной ими электроэнергии (концепция просьюмеров) [Zhu et al., 2020]. Криптовалюты (SolarCoin, EverGreenCoin, EcoCoin, EECoin, NRGcoin [Andoni et al., 2019]) снижают роль посредников в поставках электроэнергии. Подобные проекты пока реализуются в пилотном режиме [Adeyemi et al., 2020]. Объектом торговли могут стать права на выбросы углекислого газа, что особенно актуально на фоне ужесточения климатического регулирования [Andoni et al., 2019]. Инфраструктура ВИЭ включает виртуальные электростанции, обеспечивающие стабильный объем общей генерации и предложения. Она представляет собой систему небольших генерирующих объектов, объединенных открытыми интерфейсами и управляемых оператором [Dellermann et al., 2017].

Цифровые платформы снижают риски для отдельных участников и предоставляют им персонализированные сервисы. Выделяют электроэнергетические платформы, объединяющие розничную торговлю и потребителей (B2C) либо только клиентов (C2C),

платформы совместного подключения (*plug-sharing platforms*), устройства для подзарядки электромобилей и гибридных транспортных средств с возможностью передачи излишков обратно в сеть (*vehicle-to-grid*, V2G) и др. Они способны гибко управлять нагрузкой на сети. Операторы регулируют деятельность участников, роли которых могут меняться. Так, коммунальная компания на различных платформах выступает продавцом, провайдером услуги либо покупателем электроэнергии [Menzel, Teubner, 2020].

К ограничениям цифровизации отрасли относятся повышенные требования к информационной безопасности, необходимость привлечения значительных капитальных инвестиций с длительным периодом окупаемости, трудности интеграции новых устройств в действующую инфраструктуру [Edelstein, Kilian, 2007]. Технологические инновации и вовлечение потребителей в управление спросом требуют освоения новых цифровых компетенций. Темпы цифровизации в значительной мере определяются качеством регулирования и зрелостью рынка, включая сохранность и защиту данных, безопасность обмена ими, совместимость информационных систем и оборудования [Epiphaniou et al., 2020; Anderson, El Gamal, 2017; European Commission, 2017].

Новым предметом управления становятся правовые основания и принципы вовлечения потребителей в торговлю энергоресурсами. Разрабатываются отраслевые стандарты применения передовых технологий [Afanasyev et al., 2019]. Отдельных усилий требует определение правил обработки и хранения больших объемов данных отраслевыми организациями [Adeyemi et al., 2020]. Цифровизация повысит эффективность компаний. По некоторым прогнозам, следствием игнорирования этого процесса к 2025 г. станет банкротство каждого четвертого поставщика электроэнергии [Schwieters et al., 2016; Menzel, Teubner, 2020]. Технологические цифровые платформы могут изменить фокусировку инвестиционной модели — от ограниченного числа крупных программ к портфелю небольших проектов, иницируемых потребителями [Menzel, Teubner, 2020]. Масштабы трансформации рынка труда под влиянием цифровых технологий окажутся сопоставимы с последствиями либерализации и сокращения рабочих мест. К примеру, в период реформы 1998–2007 гг. занятость в электроэнергетике Германии снизилась на 20% [Graf, Jacobsen, 2021].

Подходы к изучению цифровой трансформации отраслей пока формируются. Апробируются различные количественные и качественные методы анализа [European Commission, 2019b; Zaoui, Souissi, 2020]. Большинство исследований фокусируются на применении отдельных цифровых технологий и их технико-экономических параметрах [Ketter et al., 2018; Xiong et al., 2018; Adeyemi et al., 2020; Ahmad et al., 2021; Bagdadee et al., 2020; Bertolini et al., 2020; Dileep, 2020], институциональных преобразованиях на отраслевом и национальном уровнях [Dellermann et al., 2017; Menzel, Teubner, 2020; Graf, Jacobsen, 2021]. Работы, посвященные сопоставлению различных аспектов и эффектов цифровизации, остаются единичными. Настоящая статья восполняет

пробел, обобщая тенденции, проблемы и выигрышные решения, касающиеся «зеленой» цифровой трансформации электроэнергетики.

Методология и дизайн исследования

Исследовательский инструментарий охватывает сканирование горизонтов, анализ кейсов, экспертные интервью, опросы руководителей компаний, сопоставление доступных статистических данных. Анализ научных публикаций, а также прогнозных аналитических материалов международных организаций и ведущих мировых исследовательских центров за 2017–2020 гг. позволил выявить перспективные направления «зеленой» цифровизации отрасли³.

Для изучения национальных инициатив цифровизации проведен сравнительный анализ стратегий десяти стран — крупнейших производителей и потребителей электроэнергии: Китая, США, Индии, России, Японии, Канады, Германии, Бразилии, Южной Кореи и Франции. Информация структурировалась следующим образом: страна; название программного документа с описанием мер по внедрению цифровых технологий в отрасли; ключевые направления развития сектора на национальном уровне, инструменты поддержки цифровизации. С использованием теоретических и практических подходов [Brown, Brown, 2019; Korachi, Bounabat, 2019; Lichtenthaler, 2020] определены этапы цифровой трансформации отрасли, описан ход их реализации в странах выборки, сформирован перечень основных количественных индикаторов. Источниками послужили данные Всемирного банка [World Bank, 2021], Управления энергетической информации США (Energy Information Administration) [DOE, 2021], порталы Statista [Statista, 2021a,b,c] и Автостат⁴, научные и аналитические публикации.

Предлагаемый подход вносит вклад в сопоставительные исследования процессов цифровизации электроэнергетики и может применяться для других отраслей ТЭК.

«Зеленая» цифровизация как приоритет

Государство не только стимулирует цифровизацию, но и принимает меры по смягчению ее возможных негативных последствий, таких как сокращение занятости [Graf, Jacobsen, 2021], усложнение систем управления [Ahl et al., 2020], угрозы сохранности данных [Dellerman et al., 2017], рост регуляторной нагрузки на компании и неопределенность правовых механизмов [Soshinskaya et al., 2014]. В выборку вошли крупные экономики, лидирующие по абсолютному объему генерации электроэнергии (табл. 1).

По каждой стране проанализированы доступные отраслевые документы (опубликованные преимущественно в 2015–2020 гг.). Рассмотрены стратегии развития,

аналитические материалы, посвященные технико-экономическим и технологическим аспектам, законодательные акты, регулирующие внедрение и применение отдельных технологий, установление тарифных схем и т. п. Определены ключевые характеристики цифровизации и инструменты государственной политики.

В большинстве экономик основу цифровой трансформации составляют умные сети. Внедрение других технологий (ИВ, искусственного интеллекта (ИИ), облачных технологий, цифровых двойников и др.) обычно закреплено в национальных стратегиях цифровизации, которые носят сквозной характер и охватывают широкий круг отраслей. В некоторых странах, включая Россию, стратегия цифровизации электроэнергетики оформлена в виде отдельного документа.

Китай остается мировым лидером по объемам энергопотребления и производства чистой энергии, доля которой в общей генерации достигла 30%. Инвестиции направляются прежде всего на адаптацию сетевой инфраструктуры к ВИЭ, повышение гибкости традиционных электростанций, управление спросом и развитие масштабных систем хранения. Быстрорастущий китайский рынок электрокаров имеет широкие перспективы интеграции в национальную энергетическую систему. Из-за динамично растущего энергопотребления сохраняется вероятность, что переход к чистой энергетике и углеродной нейтральности к 2060 г. останется нерезализованным. Подобного сценария можно избежать, внедрив и масштабировав все возможные инструменты цифровизации [IEA, 2019a].

В ближайшее десятилетие США останутся в числе крупнейших потребителей и производителей электроэнергии. При сохранении доминирования газогенерации доля ВИЭ продолжит расти, а угольная генерация существенно сократится. Электростанциям и энергосистемам всех типов предстоит резко повысить эффективность за счет цифровизации, рационального ресурсопользования, бережливого производства (*lean production*) и внедрения передовых аналитических систем на базе больших данных. Оптимизация рабочих процессов, цифровизация процессов и гибкое управление (*agile working*) позволят коммунальным предприятиям увеличить результативность на 3%, снизить себестоимость производства электроэнергии (исключая топливную составляющую) на 10–20% для угольных электростанций и на 5–15% — для газовых при одновременном повышении безопасности [McKinsey & Company, 2019]. Ключевые риски связаны с потерей рабочих мест и отсутствием квалифицированного персонала для вновь создаваемых «цифровых» вакансий в энергетике, а также с обеспечением надлежащей кибербезопасности при достигнутом уровне цифровизации. Как и в Канаде, регионы страны обладают высокой автономией в выборе опорных технологий генерации и цифровизации, что затрудняет их интеграцию.

³ Статьи отбирались по ключевым словам: digitalization, digital transformation, digital/smart energy, energy power industry; smart meters, Internet of energy, energy blockchain platform; green/distributed/renewable energy.

⁴ <https://www.autostat.ru/news/42999/>, дата обращения 19.02.2021.

Табл. 1. Страны с наибольшим объемом производства электроэнергии в 2019 г. и прогноз на 2030 г.

| Страна | Объем производства электроэнергии в 2019 г., ТВт | Место в рейтинге (2019) | Объем производства электроэнергии в 2030 г., ТВт | |
|-------------|--|-------------------------|--|-------------------------|
| | | | Базовый вариант | Сценарий энергоперехода |
| Китай | 7 482 | 1 | 9 952 | 9 317 |
| США | 4 385 | 2 | 4 506 | 4 153 |
| Индия | 1 614 | 3 | 2 461 | 2 365 |
| Россия | 1 122 | 4 | 1 207 | 1 146 |
| Япония | 1 013 | 5 | 1 001 | 958 |
| Канада | 649 | 6 | 690.7 | — |
| Германия | 616 | 7 | — | — |
| Бразилия | 615 | 8 | 770 | 711 |
| Южная Корея | 576 | 9 | — | — |
| Франция | 570 | 10 | — | — |

Источник: составлено авторами на основе [Enerdata, 2020; IEA, 2020f; IRENA, 2020].

Индия при сохранении текущих темпов роста экономики уже через несколько лет выйдет на первое место в мире по объему энергопотребления, обогнав Китай. До сих пор основными источниками энергии в стране служили уголь и свыше 80% импортируемой нефти. Для удовлетворения спроса и снижения зависимости от импорта ускоренными темпами наращивается солнечная генерация, которая интегрируется в сеть благодаря цифровизации. В фокусе национальных приоритетов — цифровизация сетевого хозяйства (системы мониторинга переходных процессов, передачи электроэнергии переменным током и др.) и распределения энергии (благодаря передовым системам управления — SCADA, ADMS и др.), автоматизация и проектирование цифровых подстанций (их число в стране превышало 50 в 2019 г.), поддержка просьюмеров и активных потребителей [Batra, 2019]. Базовые ограничения связаны с высоким уровнем бедности и зависимостью быстрорастущей экономики от импортируемой нефти.

В России с преимущественно газовыми тепловыми электростанциями на долю ВИЭ приходится менее 1% централизованной генерации энергии. Отраслевые инициативы вписаны в более широкую повестку цифровизации, заданную в 2019 г. национальной программой «Цифровая экономика Российской Федерации»⁵. Программа предполагает комплексное развитие информационной инфраструктуры, кадров, цифровых технологий, информационной безопасности, нормативно-правовых условий разработки и внедрения соответствующих решений в экономике, обществе и сфере государственного управления. Отдельный проект Минэнерго России «Цифровая энергетика» дополняет эту систему мер повышением надежности энергоснабжения, созданием единой отраслевой цифровой платформы для передачи данных в режиме реального времени и сбором отраслевой отчетности⁶. Для России основные сдерживающие факторы обусловлены чрезмерной централи-

зацией, ставкой на развитие единой энергосистемы, избытком организаций-посредников и высоким уровнем перекрестного субсидирования, затрудняющими принятие оптимальных решений на местах.

Японии, как и Германии, удалось обеспечить экономический рост при сокращении потребления первичной энергии (относительно уровня 1990 г.). В энергопотреблении страны в 2018 г. преобладали нефть (около 40%), газ (21%) и уголь (26%). На долю ВИЭ и гидроэнергии приходится 10%. Удельный вес генерации электроэнергии на АЭС сократился с 30% в 2011 г. до 3% в 2018 г. [IEA, 2020d] вследствие аварии на Фукусиме, которая привела к масштабному сбою в национальной электросети. В совокупности с социальными факторами (прежде всего старением населения) это повлекло постепенную реорганизацию энергоснабжения посредством цифровых технологий. Стратегия социально-экономического развития «Общество 5.0»⁷, принятая в 2016 г., предписывает анализировать разнородные большие данные (о метеорологии, работе электростанций, состоянии батарей электромобилей, режимах энергопотребления домохозяйств) с помощью ИИ. Это позволит точнее прогнозировать и оптимизировать энергопотребление, перераспределяя нагрузку на местные источники, повышая энергосбережение и сокращая воздействие на окружающую среду и климат. Согласно национальному Стратегическому энергетическому плану (*Strategic Energy Plan*) заметное влияние на структуру энергопотребления окажут ИИ, ИВ, технологии виртуальной и дополненной реальности и другие разработки. Кумулятивный эффект применения цифровых решений, систем хранения энергии и ВИЭ обеспечит достижение климатических целей декарбонизации экономики. К рискам энергоперехода в Японии можно отнести нарастающее политическое влияние Китая и Индии, ужесточение технологической конкуренции и угрозы кибербезопасности [METI, 2018].

⁵ <http://government.ru/rugovclassifier/614/events/>, дата обращения 24.02.2021.

⁶ <https://minenergo.gov.ru/node/14559>, дата обращения 19.02.2021.

⁷ https://www8.cao.go.jp/cstp/english/society5_0/index.html, дата обращения 10.02.2021.

В структуре первичного энергопотребления Канады по 30% составляют нефть и природный газ, 25 — гидроэнергия, по 3–4% — уголь и ВИЭ, остальное — атом. При этом в генерации превалирует гидроэнергетика, на долю которой приходится около 60%. По объему произведенной гидроэлектроэнергии страна уступает только Китаю и Бразилии [EIA, 2019]. Ожидается, что комбинирование чистой энергетики и цифровых технологий приведет к снижению затрат и выбросов [The Generation Energy Council, 2018]. К приоритетам цифровизации отрасли до 2050 г. отнесены повышение энергоэффективности, управление спросом и потреблением, развитие умных сетей, расширение инфраструктуры электромобилей и подготовка специалистов. Как и другие страны с высоким уровнем развития цифровизации и электрификации, Канада стоит перед вызовами обеспечения кибербезопасности и устойчивости отрасли [Canadian Electricity Association, 2019].

Европейская стратегия цифровизации (The European Digital Strategy), которой руководствуются Германия, Франция, Испания и другие страны ЕС, базируется на принципах открытости, общественного участия, устойчивого развития, конкуренции и социальной справедливости [European Commission, 2021b]. Внедрение современных информационных и коммуникационных технологий (ИКТ), включая сенсоры, средства работы с большими данными, ИИ и ИВ, повысит связность, эффективность, надежность и устойчивость энергосистем [European Commission, 2021a] за счет гармонизации сотрудничества в рамках Энергетического союза (Energy Union)⁸ и Цифрового единого рынка (Digital Single Market)⁹.

В Германии в общем объеме потребления первичных ресурсов доминируют нефть (34% в 2018 г.), природный газ (23%) и ВИЭ (14%). Страна поставила самые амбициозные для ЕС цели по декарбонизации экономики и переходу к чистым источникам энергии с применением умных счетчиков и других цифровых технологий [Gangale et al., 2017]. Достижение этих целей регулирует Закон о цифровизации энергетического перехода (The Act on the Digitisation of the Energy Transition) [BMW, EY, 2019] и Дорожная карта энергосетей будущего (Roadmap for Smart Energy Grids of the Future) [BMW, 2017]. Для этого предстоит поддерживать надежность системы в условиях роста доли ВИЭ и перехода к активно-адаптивным сетям, обеспечить защиту персональных данных и совместимость цифровых решений [BMW, 2017].

Бразилия удовлетворяет около 50% спроса на первичную энергию за счет нефти и около 30% — с помощью ВИЭ и атомной энергии. До 70% национального спроса на электроэнергию покрывает гидрогенерация, до 80% электроэнергии в стране производится из ВИЭ. ТЭК Бразилии переживает масштабные реформы, которые могут изменить ландшафт сектора в последующие десятилетия [WEF, Bain & Company, 2017]. Принятая в 2018 г. национальная стратегия цифровой трансформа-

ции E-Digital [Government of Brazil, 2018] предполагает развитие умных городов за счет внедрения технологичных ИВ, особенно в сферах мобильности, безопасности организаций ЖКХ и умных сетей энерго- и водоснабжения. Все шире применяются интеллектуальные счетчики, системы удаленного управления, автоматизированной генерации [WEF, Bain & Company, 2017], симуляторы в режиме реального времени и другие технологии прогнозирования, мониторинга и реагирования на изменения [RRE, 2017]. Цифровизация облегчит интеграцию в сеть новых ВИЭ, таких как ветер и солнце, а также формирование децентрализованных энергосистем. Особое внимание уделяется защите от киберугроз ключевой национальной инфраструктуры — информационной (депозитарии, серверы и др.) и традиционной (электроэнергетика, водоканалы, нефтегазовый сектор и др.), которая будет осуществляться совместно органами власти и бизнесом.

В энергобалансе Южной Кореи за преобладающими нефтью и углем следуют природный газ и атомная энергия. Принятый в декабре 2017 г. План по переходу на ВИЭ до 2030 г. (Renewable Energy 2030 Implementation Plan) предполагает доведение доли ВИЭ в общем объеме электроэнергии с 3 до 20% [Hong et al., 2019; IEA, 2020e]. Помимо наращивания солнечной и ветрогенерации в Девятом плане долгосрочного развития электроэнергетики (9th Basic Plan for Power Supply and Demand) намечены повышение гибкости производства, хранения, передачи и потребления энергии, поддержание высокого уровня безопасности электроснабжения. Цифровизация также находится в фокусе Мастер-плана развития энергетики до 2035 г. (Korea Energy Master Plan 2035) и Зеленой стратегии посткризисного восстановления (Green New Deal) 2020 г. Планируется перейти к управлению спросом за счет внедрения умных сетей и электросчетчиков, наращивать энергоэффективность путем развития ИКТ-инфраструктуры [MOTIE, 2014]. «Узкими местами» остаются высокая зависимость от импорта ископаемых энергоносителей, географическая замкнутость национальной электросети, удаленность центров генерации электроэнергии (юг страны) от основных районов потребления. Последнее характерно и для других стран, например Германии.

Несмотря на различия в структуре и уровне потребления первичных энергоресурсов, технологическом развитии отрасли, почти во всех указанных государствах цифровые технологии рассматриваются как инструмент повышения эффективности, перехода на чистую энергию и децентрализации энергосистем.

Национальные модели и этапы цифровой трансформации в электроэнергетике

Проанализированные источники позволяют выделить три модели цифровизации национальных энергосистем. Первая присуща странам с децентрализованным

⁸ https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/energy-union_en, дата обращения 19.03.2021.

⁹ <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/shaping-digital-single-market>, дата обращения 16.02.2021.

управлением — США и Канаде, чьи регионы (штаты, провинции) обладают достаточной автономией для выбора основного вида электрогенерации и принятия технологических решений, которые носят рыночный характер (*market pull*). Эта модель позволяет опробовать различные подходы и выбрать наиболее эффективные с учетом региональных различий (ресурсов, плотности населения, климата и т. п.). Координирующую роль в гармонизации региональных систем и решений играют национальные отраслевые ассоциации. Подобный подход касается развитых стран, не испытывающих дефицита энергоресурсов.

Вторая модель цифровизации отличает экономики с высокой зависимостью от импорта ископаемых энергоносителей, такие как Индия, Корея, Япония и Германия. Ускоренный переход на ВИЭ обусловлен здесь не только климатическими и природоохранными интересами, но и требованиями повышения энергонезависимости. В подобных условиях цифровизация обеспечит стабильность и устойчивость энергосистем, быструю передачу энергии из центров генерации потребителям, радикальное повышение энергоэффективности в рамках «технологического броска» (*technology push*).

Третья, смешанная, модель опирается одновременно на рыночные механизмы и директивное государственное управление в зависимости от сегмента электроэнергетики или сферы применения цифровых решений. Она характерна для России, Китая и Бразилии. При том что государство определяет траектории цифровизации, организации отрасли и регионы сохраняют некоторую свободу в выборе путей достижения заявленных целей.

Предложенные модели можно дополнить двумя основными этапами цифровизации отрасли. Первый предусматривает внедрение умных устройств (прежде всего счетчиков) и создание интеллектуальной инфраструктуры. Речь идет о модернизации действующих электросетей и оборудования, повышении эффективности использования материальных активов и процессов компаний за счет повсеместной интеграции умных систем учета электроэнергии, совершенствования правовой базы.

Начавшееся около десяти лет назад распространение умных счетчиков до сих пор не завершено в некоторых странах (например, в Бразилии) в силу регуляторных барьеров и длительных сроков разработки стандартов [European Commission, 2011]. Тарифная политика коммунальных предприятий США затрудняет реализацию крупных проектов цифровизации [DOE, 2015]. К 2018 г. число умных счетчиков приближалось к отметке 100 млн [BCSE, 2020].

Значительное время занимают разработка стандартов и законодательное обеспечение их применения. Государства, достигшие целевых показателей по внедрению нормативов, переходят к следующей стадии — установке умных сенсоров и датчиков нового поколения. Так, в КНР ожидается очередная волна модернизации этих устройств ввиду их относительно короткого (5–8 лет) жизненного цикла, что должно обеспечить стабильный внутренний спрос в объеме 55–60 млн в год [BMWi,

2020a]. В Канаде доля умных электросчетчиков уже достигла 82% [Natural Resources Canada, 2018]. В Южной Корее первые такие приборы устанавливались в 2009–2013 гг. в провинции Чеджудо в рамках пилотного проекта, позволившего апробировать устройства и выйти с ними на внешние рынки Перу и Камбоджи [IEA, 2020f].

Второй этап затрагивает всю цепочку создания стоимости и обеспечивает переход к чистым источникам энергии. Он предполагает системную трансформацию электроэнергетики за счет внедрения цифровых технологий и чистой энергии, строительства распределенных энергосетей и инфраструктуры умной мобильности (включая электромобили), умного энергообеспечения зданий, расширения спектра цифровых сервисов. Задействовано множество инновационных решений, таких как предиктивная аналитика на основе алгоритмов машинного обучения, автоматизация взаиморасчетов с помощью систем распределенных реестров, цифровые платформы для торговли энергоресурсами [Cardenas et al., 2014], современные системы энергоменеджмента и сквозные цифровые платформы [Vaio et al., 2021; Menzel, Teubner, 2020]. В цифровизацию вовлекаются потребители, поставщики и партнеры передающих и распределительных компаний.

Современная инфраструктура умных сетей предоставляет потребителям новые услуги благодаря отслеживанию в онлайн-режиме объемов и структуры энергопотребления и формированию дифференцированных тарифов. Аналогичный подход применяется во Франции, где счетчики Linky обеспечивают управление низковольтной сетью и дифференциацию тарифов наряду с точным мониторингом и предиктивной диагностикой, регулируемыми пиковые нагрузки [European Commission, 2020]. В Бразилии почасовой тариф (The White Hourly Tariff) позволяет отслеживать поведение домохозяйств и на базе собранной информации стимулировать их снижать потребление энергоресурсов в пиковый период с 18 до 22 часов [Dantas et al., 2018; Dranka, Ferreira, 2020]. Для повсеместной установки счетчиков предстоит привлечь около 2 млрд долл. инвестиций [Dranka, Ferreira, 2020].

На данном этапе внедряются различные цифровые технологии по всей цепочке добавленной стоимости с опорой на платформенные решения. Примером может служить проект китайской электроэнергетической госкорпорации SGCC (e-IoT) по созданию экосистемы «интернет энергии», интегрирующей цифровые платформы, систему управления спросом и другие инструменты повышения внутренней эффективности. В интересах потребителя предполагается разработать сервисы по интеграции систем распределения электроэнергии и розничной торговли, новые модели облачного трейдинга энергоресурсами [Energy Iceberg, 2019].

На каждом этапе цифровизации применяются меры государственной поддержки, которые можно разделить на три группы: финансовые, регуляторные и прочие (табл. 2–4).

Финансовые инструменты стимулируют проведение исследований и разработок (ИиР) и внедрение но-

Табл. 2. Финансовые меры поддержки цифровой трансформации электроэнергетики

| Направление | Механизм | Страна |
|---------------------------------|--|----------|
| Исследования и разработки (ИиР) | Фонды коммерциализации технологий для энергетики* | США |
| | Гранты на разработку технологий для энергетики | Германия |
| | Налоговые льготы для проведения ИиР | Индия |
| | Гранты на разработку и коммерциализацию проектов дорожной карты «Энерджинет» Национальной технологической инициативы | Россия |
| | Создание и поддержка центров разработки передовых технологий (ИИ и др.) | США |
| | Государственно-частные партнерства для создания центров превосходства в области энергетики (с участием представителей академической науки, малого и среднего бизнеса) для проведения ИиР по приоритетным направлениям | Франция |
| Внедрение цифровых решений | Гранты на модернизацию сетей передачи и распределения (Smart Grid Investment Grant program)* | США |
| | Гранты (специальные кооперационные соглашения) для изучения возможностей нового поколения умных сетей (их совмещения с действующей инфраструктурой) и технологий хранения электроэнергии (Smart Grid Demonstration Program)* | США |
| | Субсидии на приобретение электромобилей | Китай |
| | Государственные закупки электромобилей для обновления традиционного автопарка | Индия |
| | Формирование отраслевых заказов на оборудование и иную продукцию сектора | Россия |
| | Гранты на проекты интеграции распределенных энергоресурсов, устройств хранения и электромобилей | Канада |
| | Призовые конкурсы по отбору компаний — лидеров в реализации стратегий ИКТ | Япония |
| | Поддержка стартапов | Индия |
| | Фонды развития экспорта для коммерциализации решений компаний в области чистой энергетики | Канада |
| Применение | Дифференцированный тариф для регулирования пиковых нагрузок с помощью умных счетчиков в зависимости от времени суток или года* | Франция |
| | Специальный тариф для межрегиональных (межмуниципальных) объединений — пониженная ставка при передаче в пределах объединения и более высокая ввне* | Франция |
| | Специальные условия для внедрения умных счетчиков при использовании определенного вида тарифа (The White Hourly Tariff)* | Бразилия |

Примечание для табл. 2-4. Звездочкой отмечены инструменты, которые могут использоваться на первом этапе цифровизации.

Источники: составлено авторами на основе [EC-MAP, 2018; Natural Resources Canada, 2018; BMWi, EY, 2019; European Commission, 2019a; IEA, 2019b; SGCC, 2019; BMWi, 2020b; European Commission, 2020; IEA, 2020c; KAS, 2020; METI, 2020; DOE, 2021].

вых технологий. К ним относятся: гранты, субсидии, налоговые льготы на ИиР, фонды коммерциализации технологий, государственные закупки, дотации на приобретение определенных продуктов, конкурсы, финансирование стартапов, специальные тарифы и условия использования умных устройств.

Так, в России с 2016 г. в рамках Национальной технологической инициативы реализуется дорожная

карта «Энерджинет», предусматривающая гранты на разработку и коммерциализацию идей. Цифровые решения «Энерджинет» направлены на оптимизацию энергопотребления. Грамотная энергетическая политика и точечные конкурентные стимулы обеспечат им востребованность на внутреннем и глобальном рынках. Прогнозируется, что к 2035 г. доля российских компаний на мировых рынках достигнет от 3

Табл. 3. Регуляторные стимулы цифровизации электроэнергетики

| Механизм | Страна |
|---|---------------------------|
| Требование об обязательной сертификации умных устройств (счетчиков и концентраторов)* | Германия, Франция, Япония |
| «Регуляторные песочницы» в рамках демонстрационных проектов для тестирования новых моделей энергоснабжения | Южная Корея |
| Законодательное требование к доступности данных о передаче электроэнергии на розничном рынке | США |
| Законодательное требование о наличии информационных систем управления безопасностью энергосетей | Германия |
| Законодательно установленное право распределительных организаций на установление на своей территории концессионных зарядных станций для электромобилей | Бразилия |
| Доступ к различным наборам данных о хранении, сетевой инфраструктуре, метеорологии по требованию регулятора с помощью API | Франция |
| Онлайн-система комплаенса на соответствие требованиям энергетического кода страны при планировании и возведении зданий | Индия |
| Единый стандарт данных, включая формат, протокол данных для электросетевых предприятий (Green Button или the Energy Services Provider Interface standard) | Канада |

Табл. 4. Прочие механизмы, способствующие переходу к цифровой энергетике

| Направление | Механизм | Страна |
|--------------------------------------|---|-------------------------|
| Стандартизация | Разработка стратегии стандартизации — дорожная карта формирования технических стандартов в виде рекомендаций | Германия |
| | Разработка стандартов кибербезопасности, включая требование сообщать об инцидентах, которые поставили под угрозу надежность системы или могут представлять для нее будущую угрозу | США |
| | Разработка руководства по повышению безопасности промышленного интернета | Китай |
| | Ежегодный мониторинг цифровизации | Германия |
| Интегральные и платформенные решения | Создание открытой федеративной инфраструктуры данных для интеграции централизованных и децентрализованных инфраструктур в однородную среду (совместный проект GAIA-X) | Германия и Франция |
| | Платформы для электронного оказания услуг по подключению к электрическим и газораспределительным сетям | Россия |
| | Блокчейн-платформы для торговли избыточной электроэнергией, маркетплейсы на базе данных операторов рынка | Япония, Франция |
| | Новые бизнес-модели и модели поставки энергоресурсов (Mieterstrom) | Франция |
| Апробация и масштабирование | «Живые лаборатории»: тестирование технологий с высоким уровнем готовности в реальных условиях действующей правовой и физической инфраструктуры без специальных нормативных изъятий (программа SINTEG) | Германия |
| | Пилотные и демонстрационные проекты по запуску платформ и мобильных приложений на блокчейне, микрогридах, облачных платформ | США, Китай, Южная Корея |
| | Демонстрационные программы для поддержки проектов по созданию зарядной инфраструктуры электромобилей | Канада |
| | Демонстрационные проекты систем управления энергией в домохозяйствах, менеджмента энергоснабжения зданий, виртуальных электростанций | Япония |
| | Отбор лучших практик для запуска пилотных проектов и их дальнейшего масштабирования (Цифровой район электрических сетей) | Россия |

до 12%¹⁰, а объем выручки составит 40 млрд долл. в год¹¹.

Регуляторные инструменты охватывают юридически закрепленные требования к обращению с устройствами, данным и процессам их эксплуатации. Речь идет о правилах сертификации, обеспечения доступности данных, единых стандартах, организации «регуляторных песочниц». Так, в законодательстве Германии, Франции, Японии и других стран закреплено требование о сертификации умных устройств [European Commission, 2019a].

Третья группа инструментов объединяет *иные меры поддержки*, включая рекомендации по внедрению технологий, стандарты кибербезопасности, индикаторы цифровизации, вовлечение потребителей в создание сервисных платформ энергоснабжения, построение открытых инфраструктур данных, цифровых площадок для торговли электроэнергией, развитие новых бизнес-моделей и запуск пилотных проектов по энергопоставкам.

На втором этапе цифровизации арсенал мер расширяется в силу большого объема инноваций по всей цепочке создания стоимости. Среди новых направлений регулирования — управление отраслевыми данными [Avancini et al., 2019]. В последние годы ряд инициатив получают поддержку национальных регуляторов.

Франко-германский комплексный проект GAIA-X, реализуемый в форме международной некоммерческой ассоциации, предусматривает создание открытой распределенной инфраструктуры для интеграции центра-

лизованных и децентрализованных сетей в единую среду, разработку соответствующих регуляторных норм и услуг. В результате появится унифицированный формат хранения сведений о состоянии инфраструктурных объектов и иных данных.

Единые стандарты позволят объединить на общей платформе поставщиков облачных решений, высокопроизводительных вычислений, периферийных вычислительных систем и других участников рынка, расширив спектр предоставляемых услуг. Проект создает условия для развития новых бизнес-моделей (Закон об электроснабжении арендаторов жилья, Landlord-to-Tenant Electricity Act¹²), центров обработки, агрегации данных и других услуг [BMWi, 2020b].

Многие страны разрабатывают регуляторные правила по обращению с информацией в энергетике. В США законодательно оформлено требование об обеспечении доступности данных, связанных с передачей электроэнергии на розничном рынке [IEA, 2019b]. Аналогичное требование к открытости интерфейсов со сведениями о потреблении электроэнергии, сетевой инфраструктуре и метеорологической обстановке закреплено во Франции [Catapult Energy Systems, 2019].

Независимо от используемой модели интеграция в единую сеть требует повышения информационной безопасности оборудования и программного обеспечения. Так, применяемые в США нормы кибербезопасности предписывают уведомлять об инцидентах, ставящих под угрозу надежность системы [Federal Register, 2019]. Единый стандарт, принятый в США и Канаде в 2011 г.,

¹⁰ Включая надежные и гибкие распределительные сети, интеллектуальную распределенную энергетику и потребительские сервисы, а также сегменты смежных отраслей — коммунальные и ресурсные сервисы ЖКХ.

¹¹ https://www.nti2035.ru/markets/docs/DK_energynet.pdf, дата обращения 12.02.2021.

известный как Green Button (Energy Services Provider Interface, ESPI), включает формат и протокол обмена информацией между поставщиками и потребителями электроэнергии с помощью специальных приложений [Natural Resources Canada, 2018].

В сфере «зеленой» цифровизации значительные ресурсы направляются на ИиР государственных научных организаций и центров превосходства, зачастую в формате государственно-частного партнерства. Практикуются разнообразные стимулы для населения к приобретению новых технологий. В Германии реализуется проект по установке систем хранения энергии вместе с солнечными батареями, подключенными к электросети. При этом индивидуальные системы генерации могут передавать в сеть не более 50% производимой энергии. Механизм стимулирования компаний и физических лиц предусматривает инвестиционный грант, покрывающий 30% стоимости аккумуляторных батарей, и кредит с низкой процентной ставкой на оставшиеся 70%. Объектами поддержки выступают установка новых солнечных панелей и модернизация действующих солнечных электростанций, номинальная мощность которых не превышает 30 кВт/пик, а срок службы — не менее пяти лет [DIW Berlin, 2013].

Электромобильность остается приоритетным направлением развития отрасли практически во всех странах. Привлекательность электромобилей обеспечивается субсидиями на их приобретение. В Китае в 2019 г. соответствующая инфраструктура насчитывала свыше 500 тыс. точек зарядки, что на 50% превысило показатель предыдущего года. При этом именно на Китай приходится 50% мировых продаж электромобилей [BMW, 2020a]. Преимущество имеют электромобили, предусматривающие возможность не только заряжаться от сети, но и отдавать электроэнергию обратно по принципу *vehicle-to-grid* (V2G) [Clement-Nyns et al., 2011; Bibak, Tekiner-Moğulkoç, 2021].

Проект ELBE (Гамбург, Германия) предполагает установку свыше 7.4 тыс. умных зарядных станций для электромобилей по принципу распределенной системы. Участники программы могут рассчитывать на компенсацию в размере 40–60% стоимости оборудования или затрат на модернизацию сетей до сентября 2022 г. при обеспечении совместимости создаваемых станций с городским оператором, что позволит регулировать объемы потребляемой электроэнергии, в том числе в пиковые часы [IRENA, 2019; IEA, 2019c].

«Регуляторные песочницы» дают возможность апробировать новые технологии в условиях специального правового режима. В случае электроэнергетики речь идет о новых моделях предоставления услуг энергоснабжения [IEA-ISGAN, 2019]. «Живые лаборатории», напро-

тив, предназначены для тестирования технологий с высоким уровнем готовности в реальных условиях, в том числе правовых [Ahl et al., 2020]. Примером «живой лаборатории» выступает SINTEG — программа апробации и дальнейшего масштабирования инфраструктурных проектов в сфере ВИЭ-генерации в пяти регионах Германии.

Для потребителей действуют различные электронные платформы, упрощающие подключение к электро- и газораспределительным сетям (Россия)¹³ [Минэнерго России, 2019b] или торговлю избытками произведенной электроэнергии, а также маркетплейсы на базе данных операторов рынка (Япония, Франция) [SETIC, 2018].

Для сравнения продуктивности национальных моделей «зеленой» цифровизации по результатам анализа литературы выбраны следующие показатели:

- средняя продолжительность прекращений энергоснабжения [Adeyemi et al., 2020; Ahmad et al., 2021; Dileep, 2020] как критерий надежности соответствующих услуг;
- среднее значение потерь электроэнергии [Xiong et al., 2018; Leiden et al., 2021] как индикатор состояния электросетевого оборудования, влияющего на скорость внедрения цифровых технологий;
- процент умных счетчиков от общего числа [Adeyemi et al., 2020; Bertolini et al., 2020; Havle et al., 2019];
- удельный вес электромобилей в общем размере автопарка страны [Plötz et al., 2017];
- доля заправочных станций с возможностью зарядки электромобилей [Ahmad et al., 2021; Hirst, 2020].

Значения этих показателей представлены в табл. 5.

Индикаторы «зеленой» цифровизации в выбранных для анализа странах существенно варьируют. Средняя продолжительность прекращений энергоснабжения (мощности) колеблется в диапазоне от 21 до 348 мин. Наилучший показатель у Японии, наихудшие — у Индии и США с 317 и 348 мин. соответственно.

Потери электроэнергии при передаче также свидетельствуют о различной эффективности национальных сетей. В Индии они составляют около трети всей вырабатываемой электроэнергии, в Бразилии — 16%, в России — 11%. Наименьшее значение этого показателя в Японии (4%) и Германии (4.5%). В государствах с переходной экономикой утечки, как правило, составляют более 10%, в развитых — менее 5%. Доля умных счетчиков в общем их числе также колеблется от 1% в Индии до 98–99% в некоторых европейских странах и КНР.

Наименьший разброс наблюдается по доле электромобилей, не превышающей 3% общего размера автопарка. Максимального значения этот параметр достигает во Франции (2.7%) и Германии (2.96%). Однако по абсолютным показателям, как и по числу заправочных станций для автомобилей этого типа, лидирует КНР.

¹² Закон делает электроснабжение арендаторов жилья более выгодным для обеих сторон договора найма и системных операторов, которые получают от наймодателей доплату к ставке в размере от 2.2 до 3.8 центов за кВт*ч. Система стимулирует использовать технологии ВИЭ, в частности крышные солнечные панели или комбинированные системы электро- и теплогенерации. Ранее почти вся выработанная таким образом энергия поставлялась напрямую в сеть и не доходила до арендаторов в силу сложности бизнес-модели по продаже электроэнергии пользователям и отсутствия стимулов для системных операторов. Новая бизнес-модель наиболее востребована в регионах с высокими тарифами на сетевую электроэнергию, например в Берлине или Гамбурге.

¹³ <https://digital.gov.ru/uploaded/files/tsifrovaya-energetika16x915.pdf>, дата обращения 09.02.2021.

Табл. 5. Характеристика национальных моделей «зеленой» цифровизации

| Показатель | Китай | США | Индия | Россия | Япония | Канада | Германия | Бразилия | Южная Корея | Франция | Испания |
|---|------------------|------------------|---------------|-----------------|----------------|----------------|------------------|----------|-------------|------------------|----------------|
| Средняя продолжительность прекращений энергоснабжения (мин.) | — | 348 (2018) | 317 (2018) | 120 (2019) | 21 | — | — | — | — | — | — |
| Среднее значение потерь электроэнергии (%) | 5.9 (2019) | 5 | 33 | 11 (2019) | 4 | 9 | 4.46 (2018) | 16 | — | 6.41 (2018) | 8.93 (2018) |
| Доля умных счетчиков от общего их числа (%) | 99 (2018) | 57 | 1 (2019) | 10 (2018) | 67 (2018) | 80 (2019) | 15 | — | — | 22.2 (2018) | 93.1 (2018) |
| Удельный вес электромобилей в общем размере автопарка в стране (%) | 0.94 (2018) | 1.9 (2019) | 0.3 (2019) | 0.014 (2020) | 1 (2019) | 0.14 (2019) | 2.96 | — | — | 2.7 | 1.31 |
| Число заправочных станций с возможностью зарядки электромобилей (ед.) | 808 00 (2019) | 26 000 (2019) | 250 (2019) | 1612 (2019) | 7900 (2019) | 5000 (2019) | 27 459 (2019) | — | — | 24 950 (2019) | 5209 (2019) |

Источники: составлено авторами на основе [Krisher, 2020; Business Standard, 2019; Center on Global Energy Policy, 2019; EIA, 2020a, 2020b; Electric autonomy, 2020; Electrical India, 2018; IEA, 2020c; Energy Efficiency & Renewable Energy, 2019; Financial Express, 2019, 2020; Gasgoo, 2018; Rivard, 2019; d'Entremont, 2020; Naik, 2020; M2M Research Series, 2018; Nhede, 2020; Spencer-Jones, 2020; Statista, 2021a, 2021b, 2021c; TEPCO, 2015; World Bank, 2021] и данных Автостата (<https://www.autostat.ru/news/42999/>, дата обращения 19.02.2021).

По представленным в табл. 5 индикаторам Россия значительно отстает от стран ЕС. Продолжительность прекращений энергоснабжения физических лиц на территории страны регулируется законодательством¹⁴, ограничивающим такие периоды 24 часами подряд и 72 часами в год. Фактическая их продолжительность в 2019 г. не превышала двух часов¹⁵, однако сообщения об аварийной остановке подачи электроэнергии и их неблагоприятных последствиях в Красноярском крае¹⁶, Псковской области¹⁷ и других регионах часто появляются в СМИ. Нормативы энергопотерь при передаче электрическим сетям утверждаются Министерством энергетики РФ¹⁸. По мнению участников рынка, фактические технологические потери не превышают 11% (см. табл. 5).

Анализ национальных и отраслевых стратегий позволил выделить социальные, климатические, ценностные и смежноотраслевые потенциальные эффекты «зеленой» цифровизации. К социальным относятся удешевление новых технологий для просьюмеров, внедрение гибких тарифов для потребителей, сокращение периодов отключения электроэнергии, повышение ее доступности для удаленных и изолированных территорий. Основным преимуществом в климатическом плане видится снижение парниковых выбросов за счет более экономного и эффективного использования энергоресурсов и перехода на ВИЭ. Ценностная составляющая заключается в изменении паттернов потребительского

поведения и закреплении на национальном уровне приоритета устойчивого развития вместо экономического роста любой ценой. Эффекты в смежных отраслях касаются появления новых сервисов в сфере мобильности и внедрения новых стандартов в строительстве.

Заключение

В отличие от других отраслей ТЭК, электроэнергетика находится на переднем крае цифровой трансформации — от внедрения облачных платформ ИВ и специализированных приложений до оптимизации всей цепочки производства и потребления энергии. Можно сказать, что отрасль максимально приблизилась к образу желаемого будущего цифровой экономики, доказывая его достижимость. Цифровизация, декарбонизация и децентрализация стали ключевыми векторами развития энергетики в большинстве стран мира. Цифровые технологии открывают возможность перехода к новым бизнес-моделям и широкому распространению ВИЭ.

Выделены три страновые модели и два основных этапа цифровой трансформации отрасли, различающиеся в зависимости от степени централизации принятия решений, импорта энергоресурсов и ориентации на спрос или предложение технологий (*market pull — technology push*). Анализ стратегических документов национального уровня позволил определить социальные,

¹⁴ Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения по ГОСТ 32144 – 2013; постановления Правительства РФ № 354 от 06.05.2011 г. и № 442 от 04.05.2012 г.

¹⁵ <https://tass.ru/ekonomika/7898243>, дата обращения 19.02.2021.

¹⁶ <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/5efec2ab9a79477bda91c7e8>, дата обращения 19.02.2021.

¹⁷ <https://www.gtrkpskov.ru/news-feed/vesti-pskov/15165-v-pskovskoj-oblasti-proizoshli-massovye-otklyucheniya-elektroenergii.html>, дата обращения 19.02.2021.

¹⁸ В соответствии с постановлением Правительства РФ № 861 от 27.12.2004 г.

климатические и ценностные эффекты, оценить их влияние на смежные сектора.

К социальным относятся снижение стоимости и повышение доступности новых энергетических технологий благодаря развитию отрасли, конкуренции и государственной поддержке. Применение цифровых технологий в электроэнергетике способствует более рациональному потреблению ресурсов игроками отрасли и потребителями, надежному и равномерному распределению энергоресурсов. Анализ больших данных о потребительском поведении дает возможность поставщикам формировать гибкие тарифы в зависимости от паттернов энергопотребления. Снижение издержек и ресурсоемкости компаний сокращает затраты и тарифы, а децентрализованные системы повышают доступность электроэнергии для жителей удаленных и изолированных территорий. Усилия компаний по повышению экономической и технологической эффективности напрямую влияют на надежность и бесперебойность поставок электроэнергии потребителям. Помимо перечисленных эффектов цифровизация электроэнергетики способствует устойчивому росту отрасли и экономики в целом.

Хотя государства и бизнес декларируют приверженность снижению антропогенного воздействия на окружающую среду и климат, на операционном уровне эти цели не всегда отвечают интересам цифровизации. Рационализация использования ресурсов (например, снижение потерь при передаче электроэнергии), повышение энергоэффективности и переход к чистой энергии прямо указывают на связь цифровизации и «зеленого» роста. Однако подобные преобразования невозможны без изменения ценностных установок, что в значительной мере зависит от информационной и просветительской деятельности государства.

Переход к устойчивому развитию и цифровым технологиям ведет к изменениям во многих отраслях, включает такие межотраслевые эффекты, как формирование новых бизнес-моделей, паттернов мобильности, внедрение «зеленых» стандартов в строительстве и возникновение новых сегментов ИКТ-индустрии.

Статья подготовлена в рамках гранта, предоставленного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (№ соглашения о предоставлении гранта: 075-15-2020-928).

Библиография

- Adeyemi A., Yan M., Shahidehpour M., Botero C., Guerra A.V., Gurung N., Zhang L., Paaso A. (2020) Blockchain Technology Applications in Power Distribution Systems. *The Electricity Journal*, 33(8), 106817. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106817>
- Afanasyev V.Ya., Lyubimova N.G., Ukolov V.F., Shayakhmetov S.R. (2019) Digitalization of Energy Manufacturing: Infrastructure, Supply Chain Strategy and Communication. *International Journal of Supply Chain Management*, 8(4), 601–609.
- Afanasyev V.Ya., Ukolov V.F., Bolshakova O.I., Kislenco N.A., Alekseev A.O. (2020) Adaptive Impact Factor Research Concerning Effectiveness of the Introduction and Use of Digital Twins for Oil and Gas Deposits. *International Journal of Criminology and Sociology*, 9, 2043–2047. DOI: 10.6000/1929-4409.2020.09.239
- Ahl A., Yarime M., Goto M., Chopra S.S., Kumar N.M., Tanaka K., Sagawa D. (2020) Exploring Blockchain for the Energy Transition: Opportunities and Challenges Based on a Case Study in Japan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109488. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109488>
- Ahmad T., Zhang D., Huang C., Zhang H., Dai N., Song Y., Chen H. (2021) Artificial Intelligence in Sustainable Energy Industry: Status Quo, Challenges and Opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125834. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125834>
- Anderson K., El Gamal A. (2017) Co-Optimizing the Value of Storage in Energy and Regulation Service Markets. *Energy Systems*, 8(2), pp. 369–387. <https://doi.org/10.1007/s12667-016-0201-0>
- Andoni M., Robu V., Flynn D., Abram S., Geach D., Jenkins D., Peacock A. (2019) Blockchain Technology in the Energy Sector: A Systematic Review of Challenges and Opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 100, 143–174. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>
- Avancini D.B., Rodrigues J.J., Martins S.G., Rabêlo R.A., Al-Muhtadi J., Solic P. (2019) Energy Meters Evolution in Smart Grids: A Review. *Journal of Cleaner Production*, 217, 702–715. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.229>
- Bagdadee A.H., Hoque M.Z., Zhang L. (2020) IoT Based Wireless Sensor Network for Power Quality Control in Smart Grid. *Procedia Computer Science*, 167, 1148–1160. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.417>
- Barbier E.B. (2020) Greening the Post-Pandemic Recovery in the G20. *Environmental and Resource Economics*, 76(4), 685–703. <https://doi.org/10.1007/s10640-020-00437-w>
- Batra P. (2019) *Geo Smart Energy — Building a National Integrated Management System*. <https://geosmartindia.net/speaker/presentations2019/geosmart%20energy%20building%20national%20integrated%20management%20system%20Pankaj%20Batra.pdf>, дата обращения 19.02.2021.
- BCSE (2020) *Sustainable Energy in America*. <https://www.bcse.org/wp-content/uploads/2020-Sustainable-Energy-in-America-Factbook.pdf#page=121>, дата обращения 19.02.2021.
- BDEW (2019) *BDEW Energy Market Germany 2019 in German and English*. https://www.bdew.de/media/documents/Pub_20190603_Energy-Market-Germany-2019.pdf, дата обращения 19.02.2021.
- Beier G., Niehoff S., Ziemis T., Xue B. (2017) Sustainability Aspects of a Digitalized Industry — A Comparative Study From China and Germany. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 4(2), 227–234. <https://doi.org/10.1007/s40684-017-0028-8>
- Bertolini B., Buso M., Greco L. (2020) Competition in Smart Distribution Grids. *Energy Policy*, 145, 111729. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111729>
- Bibak B., Tekiner-Moğulkoç H. (2021) A Comprehensive Analysis of Vehicle to Grid (V2G) Systems and Scholarly Literature on the Application of Such Systems. *Renewable Energy Focus*, 36, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2020.10.001>
- BMW (2017) *Electricity 2030 — Concluding Paper*. <https://www.bmw.de/Redaktion/EN/Publikationen/electricity-2030-concluding-paper.html>, дата обращения 03.02.2021.

- BMW (2020a) *China Energy Transition Status Report 2020. Sino-German Energy Transition Project*. https://www.energypartnership.cn/fileadmin/user_upload/china/media_elements/publications/China_Energy_Transition_Status_Report.pdf, дата обращения 03.02.2021.
- BMW (2020b) *GAIA-X: Driver of Digital Innovation in Europe. Featuring the Next Generation of Data Infrastructure*. https://www.bmw.de/Redaktion/EN/Publikationen/gaia-x-driver-of-digital-innovation-in-europe.pdf?__blob=publicationFile&v=8, дата обращения 03.02.2021.
- BMW, EY (2019) *Barometer Digitalisierung der Energiewende Wichtige Voraussetzungen für die Digitalisierung wurden geschaffen Berichtsjahr 2019*. https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/barometer-digitalisierung-der-energiewende-berichtsjahr-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=8, дата обращения 15.02.2021.
- Brown N., Brown I. (2019) *From Digital Business Strategy to Digital Transformation — How? A Systematic Literature Review*. Paper presented at the SAICSIT 2019 Conference, September 2019. <https://doi.org/10.1145/3351108.3351122>
- Business Standard (2019) *Nearly 400,000 Electric Vehicles in India, UP Leads Race*. https://www.business-standard.com/article/automobile/nearly-400-000-electric-vehicles-in-india-up-leads-race-delhi-at-2nd-spot-119071500233_1.html, дата обращения 19.02.2021.
- Canadian Electricity Association (2019) *State of the Canadian Electricity Industry*. https://cea-ksiu6qbsd.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2019/02/AIO_Report_2019_Digital.pdf, дата обращения 10.03.2021.
- Cardenas J., Gemoets L., Ablanedo Rosas J., Sarfi R. (2014) A Literature Survey on Smart Grid Distribution: An Analytical Approach. *Journal of Cleaner Production*, 65, 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.019>
- Carvalho P. (2015) Smart Metering Deployment in Brazil. *Energy Procedia*, 83, 360–369. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.211>
- Catapult Energy Systems (2019) *A Strategy for a Modern Digitalised Energy System*. <https://es.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2019/06/Catapult-Energy-Data-Taskforce-Report-A4-v4AW-Digital.pdf>, дата обращения 03.02.2021.
- Cavanagh R. (2021) Energy Efficiency and Decarbonization: Priorities for Regulated Utilities. *The Electricity Journal*, 34(2), 106908. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106908>
- Center on Global Energy Policy (2019) *Electric Vehicle Charging In China And The United States*. https://energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/file-uploads/EV_ChargingChina-CGEP_Report_Final.pdf, дата обращения 19.02.2021.
- Clement-Nyns K., Haesen E., Driesen J. (2011) The Impact of Vehicle-to-Grid on the Distribution Grid. *Electric Power Systems Research*, 81(1), 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2010.08.007>
- D'Entremont C. (2020) *Why 80 Per Cent of Canadians are Already Using Smart Meters*. <https://huddle.today/why-80-per-cent-of-canadians-are-already-using-smart-meters/>, дата обращения 13.02.2021.
- Dantas G.D.A., de Castro N.J., Dias L., Antunes C.H., Vardiero P., Brandão R., Zamboni L. (2018) Public Policies for Smart Grids in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 501–512. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.077>
- Dellermann D., Fliaster A., Kolloch M. (2017) Innovation Risk in Digital Business Models: The German Energy Sector. *Journal of Business Strategy*, 38(5), 35–43. <https://doi.org/10.1108/JBS-07-2016-0078>
- Di Vaio A., Palladino R., Pezzi A., Kalisz D.E. (2021) The Role of Digital Innovation in Knowledge Management Systems: A Systematic Literature Review. *Journal of Business Research*, 123, 220–231. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.09.042>
- Dileep G. (2020) A Survey on Smart Grid Technologies and Applications. *Renewable Energy*, 146, 2589–2625. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.092>
- DIW Berlin (2013) *Policy Efforts for the Development of Storage Technologies in the U.S. and Germany*. <https://d-nb.info/1153062666/34>, дата обращения 19.02.2021.
- DOE (2015) *United States Electricity Industry Primer*, Washington, D.C.: Department of Energy. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/12/f28/united-states-electricity-industry-primer.pdf>, дата обращения 09.02.2021.
- DOE (2021) *Recovery Act: Smart Grid Investment Grant Program*, Washington, D.C.: Department of Energy. https://www.smartgrid.gov/recovery_act/overview/smart_grid_investment_grant_program.html, дата обращения 27.02.2021.
- Dranka G.G., Ferreira P. (2020) Towards a Smart Grid Power System in Brazil: Challenges and Opportunities. *Energy Policy*, 136, 111033. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111033>
- EC-MAP (2018) *New Policy For An Era Of Energy Digitalization: Power*. <http://ec-map.org/wp-content/uploads/2018/10/Power-Whitepaper.pdf>, дата обращения 27.02.2021.
- Edelstein P., Kilian L. (2007) *The Response of Business Fixed Investment to Changes in Energy Prices: A Test of Some Hypotheses About the Transmission of Energy Price Shocks*. <https://repec.cepr.org/repec/cpr/ceprdp/DP6507.pdf>, дата обращения 19.02.2021.
- EIA (2019) *Canada. Country analysis. Overview*, Washington, D.C.: Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/international/analysis/country/CAN>, дата обращения 09.03.2021.
- EIA (2020a) *How Much Electricity Is Lost in Electricity Transmission and Distribution in the United States?*, Washington, D.C.: Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=105&t=3#:~:text=The%20U.S.%20Energy%20Information%20Administration,in%20the%20State%20Electricity%20Profiles,> дата обращения 10.02.2021.
- EIA (2020b) *U.S. Customers Experienced an Average of Nearly Six Hours of Power Interruptions in 2018*, Washington, D.C.: Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=43915#:~:text=In%202018%2C%20power%20outage%20durations,averaged%205.8%20hours%20per%20customer,> дата обращения 10.02.2021.
- Electric Autonomy (2020) *Canada's EV Charging Networks Are Growing at Pace, But More Is Needed*. https://electricautonomy.ca/2020/03/02/canadas-ev-charging-networks-2020/#/analyze?country=CA&fuel=ELEC&ev_levels=all&show_map=true, дата обращения 10.02.2021.
- Electrical India (2018) *Transmission Losses in India*. <https://www.electricalindia.in/transmission-losses-in-india/>, дата обращения 13.02.2021.
- Enerdata (2020) *Global Energy Statistical Yearbook 2020*. <https://yearbook.enerdata.net/electricity/world-electricity-production-statistics.html>, дата обращения 19.02.2021.
- Energy Efficiency & Renewable Energy (2019) *Plug-in Vehicle Sales Accounted for About 2% of All Light-Duty Vehicle Sales in the United States in 2019*. <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1136-june-1-2020-plug-vehicle-sales-accounted-about-2-all-light-duty>, дата обращения 10.02.2021.
- Energy Iceberg (2019) *Chinese Grids' Transformation to Benefit Digital & Tech Companies Globally*. <https://energyiceberg.com/chinese-grids-transformation-to-benefit-digital-tech-companies-globally/>, дата обращения 19.02.2021.
- Epiphaniou G., Bottarelli M., Al-Khateeb H., Ersotelos N.T., Kanyaru J., Nahar V. (2020) Smart Distributed Ledger Technologies in Industry 4.0: Challenges and Opportunities in Supply Chain Management. In: *Cyber Defence in the Age of AI, Smart Societies and Augmented Humanity* (eds. H. Jahankhani, S. Kendzierskyj, N. Chelvachandran, J. Ibarra Jimenez), Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, pp. 319–345. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35746-7_15
- European Commission (2011) *Smart Grids: From Innovation to Deployment*, Brussels: European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011SC0463&from=EN>, дата обращения 19.02.2021.

- European Commission (2017) *Cyber Security in the Energy Sector. Recommendations for the European Commission on a European Strategic Framework and Potential Future Legislative Acts for the Energy Sector*, Brussels: European Commission. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/eecsp_final.pdf, дата обращения 09.02.2021.
- European Commission (2019a) *Assessment and roadmap for the digital transformation of the energy sector towards an innovative internal energy market*, Brussels: European Commission. https://www.euneighbours.eu/sites/default/files/publications/2020-03/MJ0220185ENN_en.pdf, дата обращения 09.02.2021.
- European Commission (2019b) *Digital Transformation in Transport, Construction, Energy, Government and Public Administration*, Brussels: European Commission. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC116179/jrc_digital_transformation_final_online_en_baja_resoluci%3%b3n_online.pdf, дата обращения 09.02.2021.
- European Commission (2020) *Integrated National Energy and Climate Plan for France*, Brussels: European Commission. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/fr_final_necr_main_en.pdf, дата обращения 19.02.2021.
- European Commission (2021a) *Digitalisation*, Brussels: European Commission. https://ec.europa.eu/energy/topics/technology-and-innovation/digitalisation_en, дата обращения 09.02.2021.
- European Commission (2021b) *The European Digital Strategy*, Brussels: European Commission. <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/content/european-digital-strategy>, дата обращения 09.02.2021.
- Federal Register (2019) *Critical Infrastructure Protection Reliability Standard CIP-012-1-Cyber Security-Communications Between Control Centers*. <https://www.federalregister.gov/documents/2019/04/24/2019-08236/critical-infrastructure-protection-reliability-standard-cip-012-1-cyber-security-communications>, дата обращения 09.02.2021.
- Financial Express (2019) *Powered up: Average electricity cut duration falls in May*. <https://www.financialexpress.com/economy/power-up-all-india-average-electricity-cut-duration-falls-in-may/1608184/>, дата обращения 10.02.2021.
- Financial Express (2020) *Smart meters: Time to make that smart switch*. <https://www.financialexpress.com/industry/smart-meters-time-to-make-that-smart-switch/2092936/>, дата обращения 13.02.2021.
- Gangale F., Vasiljevska J., Covrig C.F., Mengolini A., Fulli G. (2017) *Smart grid projects outlook 2017*, Brussels: European Commission. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC106796/sgp_outlook_2017-online.pdf, дата обращения 09.02.2021.
- Gasgoo (2018) *China car population reaches 235 million units, Ministry of Public Security*. http://autonews.gasgoo.com/china_news/70015270.html, дата обращения 13.02.2021.
- Gatto A., Drago C. (2020) Measuring and modeling energy resilience. *Ecological Economics*, 172. 106527. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106527>
- Ghobakhloo M. (2018) The future of manufacturing industry: A strategic roadmap toward Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29(6), 910–936. <https://doi.org/10.1108/JMTM-02-2018-0057>
- Government of Brazil (2018) *Brazilian Digital Transformation Strategy E-Digital*. <https://www.gov.br/mcti/pt-br/centrais-de-conteudo/comunicados-mcti/estrategia-digital-brasileira/digitalstrategy.pdf>, дата обращения 09.02.2021.
- Graf P., Jacobsen H. (2021) Institutional work in the transformation of the German energy sector. *Utilities Policy*, 68, 101107. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101107>
- Havle B., Dursun M. (2019) *Digital Transformation in Energy Industry: A Literature Review for Future Studies*. Paper presented at the 3rd International Conference on Data Science and Business Analytics (ICDSBA) 11–12 October 2019. DOI: 10.1109/ICDSBA48748.2019.00043
- Hirst D. (2020) *Electric vehicles and infrastructure* (Briefing Paper CBP07480). <https://commonslibrary.parliament.uk/research-briefings/cbp-7480/>, дата обращения 06.07.2021.
- Hong J., Kim J., Son W., Shin H., Kim N., Lee W.K., Kim J. (2019) Long-term energy strategy scenarios for South Korea: Transition to a sustainable energy system. *Energy Policy*, 127, 425–437. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.055>
- IEA (2017) *Digitalisation and Energy*, Paris: International Energy Agency. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/b1e6600c-4e40-4d9c-809d-1d1724c763d5/DigitalizationandEnergy3.pdf>, дата обращения 09.02.2021.
- IEA (2019a) *China Power System Transformation*, Paris: International Energy Agency. https://iea.blob.core.windows.net/assets/fd886bb9-27d8-4d5d-a03f-38cb34b77ed7/China_Power_System_Transformation.pdf, дата обращения 09.02.2021.
- IEA (2019b) *Energy Policy of the IEA Countries. The United States 2019 Review*, Paris: International Energy Agency. <https://webstore.iea.org/download/summary/2829>, дата обращения 09.02.2021.
- IEA (2019c) *Project ELBE (incentive programme for EV charging infrastructure)*, Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/policies/8540-project-elbe-incentive-programme-for-ev-charging-infrastructure>, дата обращения 09.02.2021.
- IEA (2020a) *Electricity Market Report — December 2020*, Paris: International Energy Agency. https://iea.blob.core.windows.net/assets/a695ae98-cec1-43ce-9cab-c37bb0143a05/Electricity_Market_Report_December_2020.pdf, дата обращения 09.02.2021.
- IEA (2020b) *Energy end-use data collection methodologies and the emerging role of digital technologies*, Paris: International Energy Agency. https://iea.blob.core.windows.net/assets/34e2659e-809c-4299-bb51-c0343257af08/Energy_end-use_data_collection_methodologies_and_the_emerging_role_of_digital_technologies.pdf, дата обращения 15.02.2021.
- IEA (2020c) *India 2020. Energy Policy Review*, Paris: International Energy Agency. https://niti.gov.in/sites/default/files/2020-01/IEA-India%202020-In-depth-EnergyPolicy_0.pdf, дата обращения 07.02.2021.
- IEA (2020d) *Japan*, Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/countries/japan>, дата обращения 09.02.2021.
- IEA (2020e) *Korea*, Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/countries/korea>, дата обращения 09.02.2021.
- IEA (2020f) *World Energy Outlook 2020*, Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>, дата обращения 09.02.2021.
- IEA-ISGAN (2019) *Innovative Regulatory Approaches with Focus on Experimental Sandboxes*, Paris: International Energy Agency. https://www.iea-isgan.org/wp-content/uploads/2019/05/ISGAN_Casebook-on-Regulatory-Sandbox-A2-1.pdf, дата обращения 19.02.2021.
- IRENA (2019) *Electrification with renewables: Driving the transformation of energy services*, Abu-Dhabi: IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jan/IRENA_RE-Electrification_SGCC_2019_preview.pdf, дата обращения 09.02.2021.
- IRENA (2020) *Renewable capacity statistics 2020*, Abu-Dhabi: IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf, дата обращения 09.02.2021.
- Kamble S.S., Gunasekaran A., Gawankar S.A. (2018) Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 408–425. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>
- Kang H.S., Lee J.Y., Choi S., Kim H., Park J.H., Son J.Y., Do Noh S. (2016) Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(1), 111–128. <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0015-5>

- KAS (2020) *Sustainable Energy and Digitalisation: Practices and Perspectives in Asia-Pacific*. <https://www.kas.de/documents/265079/265128/Sustainable+Energy+and+Digitalisation+Practices+and+Perspectives+in+Asia+Pacific.pdf/a1a26d16-fa77-ac3f-c688-92d91bca6834?version=1.0&t=1581407991474>, дата обращения 19.02.2021.
- Ketter W., Collins J., Saar-Tsechansky M., Marom O. (2018) Information systems for a smart electricity grid: Emerging challenges and opportunities. *ACM Transactions on Management Information Systems (TMIS)*, 9(3), 1–22. <https://doi.org/10.1145/3230712>
- Korachi Z., Bounabat B. (2019) Towards a Maturity Model for Digital Strategy Assessment. In: *Proceedings of the AI2SD 2019 Conference*, Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, pp. 456–470. DOI: 10.1007/978-3-030-36674-2_47
- Krisher T. (2020) *Plug it in: Electric car charging station numbers are rising*. <https://apnews.com/article/business-u-s-news-technology-detroit-electric-vehicles-0dbe44f4626fcd6b3ccee274980188e#:~:text=There%20are%20now%2026%2C000%20electric,with%20more%20than%2084%2C000%20plugs>, дата обращения 13.02.2021.
- Leiden A., Herrmann C., Thiede S. (2021) Cyber-physical production system approach for energy and resource efficient planning and operation of plating process chains. *Journal of Cleaner Production*, 280, 125160. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125160>
- Lichtenthaler U. (2020) Building blocks of successful digital transformation: Complementing technology and market issues. *International Journal of Innovation and Technology Management*, 17(1), 1–14. <https://doi.org/10.1142/S0219877020500042>
- M2M Research Series (2018) *Smart Metering in North America and Asia-Pacific*. <https://www.marketresearch.com/Berg-Insight-v2702/Smart-Metering-North-America-Asia-12517854/>, дата обращения 10.02.2021.
- Malerba F. (2002) Sectoral systems of innovation and production. *Research Policy*, 31(2), 247–264. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(01\)00139-1](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(01)00139-1)
- McKinsey & Company (2019) *Unlocking the value of digital operations in electric-power generation*. <https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/unlocking-the-value-of-digital-operations-in-electric-power-generation#>, дата обращения 19.02.2021.
- Menzel T., Teubner T. (2020) Green energy platform economics — understanding platformization and sustainability in the energy sector. *International Journal of Energy Sector Management*, 15(3), 456–475. <https://doi.org/10.1108/IJESM-05-2020-0022>
- METI (2018) *Strategic Energy Plan*. https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/others/basic_plan/5th/pdf/strategic_energy_plan.pdf, дата обращения 08.02.2021.
- METI (2020) *Guidebook on Corporate Governance for Privacy in Digital Transformation (DX) ver.1.0 Formulated*. https://www.meti.go.jp/english/press/2020/0828_006.html, дата обращения 08.02.2021.
- Midttun A., Piccini P.B. (2017) Facing the climate and digital challenge: European energy industry from boom to crisis and transformation. *Energy Policy*, 108, 330–343. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.05.046>
- Mika B., Goudz A. (2020) Blockchain-technology in the energy industry: Blockchain as a driver of the energy revolution? With focus on the situation in Germany. *Energy Systems*, 12, 285–355. <https://doi.org/10.1007/s12667-020-00391-y>
- Montevicchi F., Stickler T., Hintemann R., Hinterholzer S. (2020) *Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market*, Brussels: European Commission. https://www.researchgate.net/profile/Simon_Hinterholzer/publication/345687292_Energy-efficient_Cloud_Computing_Technologies_and_Policies_for_an_Eco-friendly_Cloud_Market/links/5faacbcf4585150781066c41/Energy-efficient-Cloud-Computing-Technologies-and-Policies-for-an-Eco-friendly-Cloud-Market.pdf, дата обращения 19.02.2021.
- MOTIE (2014) *Korea Energy Master Plan. Outlook & Policies to 2035*. https://www.motie.go.kr/common/download.do?fid=bbs&bbs_cd_n=72&bbs_seq_n=209286&file_seq_n=2, дата обращения 19.02.2021.
- Müller J.M., Kiel D., Voigt K.I. (2018) What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. *Sustainability*, 10(1), 247. <https://doi.org/10.3390/su10010247>
- Naik A.R. (2020) *The Math Behind India's Electric Vehicle Charging Infrastructure*. <https://inc42.com/features/the-math-behind-indias-electric-vehicle-charging-infrastructure/#:~:text=According%20to%20a%20MarketWatch%2C%20at,expected%20to%20witness%20massive%20growth>, дата обращения 113.02.2021.
- Natural Resources Canada (2018) *Smart Grid in Canada*. <https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/canmetenergy/pdf/Smart%20Grid%20in%20Canada%20Report%20Web%20FINAL%20EN.pdf>, дата обращения 09.02.2021.
- Newberry S. (2001) Network structures, consumers and accountability in New Zealand. In: *Learning from International Public Management Reform: Part A* (eds. L.R. Jones, J. Guthrie, P. Steane), Bingley: Emerald Group Publishing Limited, pp. 257–278. [https://doi.org/10.1016/S0732-1317\(01\)11054-7](https://doi.org/10.1016/S0732-1317(01)11054-7)
- Noussan M., Raimondi P.P., Scita R., Hafner M. (2021) The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition — A Technological and Geopolitical Perspective. *Sustainability*, 13(1), 298. <https://doi.org/10.3390/su13010298>
- OECD (2019a) *Measuring the Digital Transformation: A Roadmap for the Future*, Paris: OECD. <https://www.oecd.org/going-digital/measurement-roadmap.pdf>, дата обращения 09.02.2021.
- OECD (2019b) *Vectors of Digital Transformation OECD Digital Economy Papers*, Paris: OECD. <https://www.sipotra.it/wp-content/uploads/2019/03/VECTORS-OF-DIGITAL-TRANSFORMATION.pdf>, дата обращения 14.02.2021.
- Plötz P., Sprei F., Gnann T. (2017) *What are the effects of incentives on plugin electric vehicle sales in Europe?* Paper presented at the ECEEE 2017 Summer Study – Consumption, Efficiency & Limits. https://www.researchgate.net/publication/318209508_What_are_the_effects_of_incentives_on_plugin_electric_vehicle_sales_in_Europe, дата обращения 09.02.2021.
- Ratnam K.S., Palanisamy K., Yang G. (2020) Future low-inertia power systems: Requirements, issues, and solutions. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, 109773. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109773>
- Rivard G. (2019) *Over 40,000 Plug-In Cars Sold in Canada*. <https://www.guideautoweb.com/en/articles/52849/over-40-000-plug-in-cars-sold-in-canada-so-far-in-2019/>, дата обращения 13.02.2021.
- Rodríguez F., Sánchez-Guardamino I., Martín F., Fontán L. (2020) Non-intrusive, self-supplying and wireless sensor for monitoring grounding cable in smart grids. *Sensors and Actuators A: Physical*, 316, 112417. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112417>
- RRE (2017) *Digitalization in the Brazilian Energy Sector: Time for Disruption?* <https://digital.hbs.edu/platform-rctom/submission/digitalization-in-the-brazilian-energy-sector-time-for-disruption/#>, дата обращения 19.02.2021.
- Schwieters N., Hasse F., von Perfall A., Maas H., Willms A., Lenz F. (2016) *Deutschlands energiewersorger werden digital*, Frankfurt: PricewaterhouseCoopers. <https://www.pwc.de/de/pressemitteilungen/2016/deutschlands-energieversorger-werden-digital-aber-zu-langsam.html>, дата обращения 19.02.2021.
- SETIC (2018) *Digitalisation of the Energy Sector*. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC113569/setis_magazine_17_online.pdf, дата обращения 09.02.2021.

- SGCC (2019) *Internet of Things White Paper*. <http://www.sgcc.com.cn/html/files/2019-10/14/20191014235609307380194.pdf>, дата обращения 08.02.2021.
- Shahidehpour M., Fotuhi-Friuzabad M. (2016) Grid modernization for enhancing the resilience, reliability, economics, sustainability, and security of electricity grid in an uncertain environment. *Scientia Iranica*, 23(6), 2862–2873. DOI: 10.24200/SCI.2016.3995
- Song E.Y., FitzPatrick G.J., Lee K.B. (2017) Smart sensors and standard-based interoperability in smart grids. *IEEE Sensors Journal*, 17(23), 7723–7730. DOI: 10.1109/JSEN.2017.2729893
- Soshinskaya M., Crijns-Graus W.H.J., Guerrero J.M., Vasquez J.C. (2014) Microgrids: Experiences, barriers and success factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 659–672. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.198>
- Statista (2021a) *Electric car market share in Japan 2010-2019*. <https://www.statista.com/statistics/711994/japan-electric-car-market-share/#:~:text=As%20of%202019%2C%20approximately%200.9,and%202018%20were%20expanding%20rapidly>, дата обращения 10.02.2021.
- Statista (2021b) *Electric power transmission loss in China from 2010 to 2019*. <https://www.statista.com/statistics/302292/china-electric-power-transmission-loss/#:~:text=Electric%20power%20transmission%20loss%20in%20China%202010%2D2019&text=This%20statistic%20represents%20electric%20power,to%20transmission%20and%20distribution%20resistance>, дата обращения 13.02.2021.
- Statista (2021c) *Number of EVSE fast chargers in Japan 2010-2019*. <https://www.statista.com/statistics/712010/japan-evse-fast-charger-stock/>, дата обращения 10.02.2021.
- Teece D.J. (2018) Profiting from innovation in the digital economy: Enabling technologies, standards, and licensing models in the wireless world. *Research Policy*, 47(8), 1367–1387. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2017.01.015>
- TEPCO (2015) *TEPCO Power Grid*. <https://www.tepco.co.jp/en/pg/supply/quality/index-e.html>
- The Generation Energy Council (2018) *Canada's Energy Transition. Getting to our Energy Future, Together. Generation Energy Council Report*. https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/CouncilReport_june27_English_Web.pdf, дата обращения 10.03.2021.
- Tripathi V., Kaur A. (2020) Socially responsible investing: Performance evaluation of BRICS nations. *Journal of Advances in Management Research*, 17(4), 525–547. <https://doi.org/10.1108/JAMR-02-2020-0020>
- Waite M., Cohen E., Torbey H., Piccirilli M., Tian Y., Modi V. (2017) Global trends in urban electricity demands for cooling and heating. *Energy*, 127, 786–802. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.095>
- WEF (2016) *Electricity: uncovering value through digital transformation*, Geneva: World Economic Forum. <https://reports.weforum.org/digital-transformation/electricity-an-industry-ready-for-digitization/>, дата обращения 09.02.2021.
- WEF, Bain & Company (2017) *The Future of Electricity: New Technologies Transforming the Grid Edge*, Geneva: World Economic Forum. https://media.bain.com/Images/WEF_Future_of_Electricity_2017.pdf, дата обращения 19.02.2021.
- Wertani H., Salem J.B., Lakhoua M.N. (2020) Analysis and supervision of a smart grid system with a systemic tool. *The Electricity Journal*, 33(6), 106784. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106784>
- World Bank (2021) *Electric power transmission and distribution losses (% of output)*. <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS>, дата обращения 19.02.2021.
- Xiong R., Chen H., Wang C., Sun F. (2018) Towards a smarter hybrid energy storage system based on battery and ultracapacitor — A critical review on topology and energy management. *Journal of Cleaner Production*, 202, 1228e1240. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.134>
- Zaoui F., Souissi N. (2020) Roadmap for digital transformation: A literature review. *Procedia Computer Science*, 175, 621–628. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.07.090>
- Zhu Z., Li X., Ding Y., Liu Z. (2020) Demand response capacity constrained optimisation of multicast routing in smart grid. *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, 19(1), 33–41. DOI: 10.1504/IJWMC.2020.109259