

Предпечатная версия

«Зеленая» цифровая трансформация в электроэнергетике

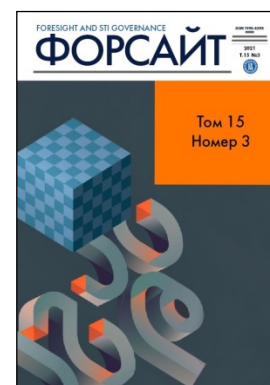
Авторы: Ю. Туровец, Л. Проскурякова, А. Стародубцева, В. Бьянко

Принята к публикации: журнал «Форсайт»

Дата поступления: 26.02.2021

Дата принятия: 10.04.2021

Цитирование: Туровец Ю., Проскурякова Л., Стародубцева А., Бьянко В. (2021) «Зеленая» цифровая трансформация в электроэнергетике. *Форсайт*, 15(3) (в печати).



Данная версия статьи прошла рецензирование, включена в публикационный портфель журнала «Форсайт» и получила предварительные метаданные. Представленная версия не является окончательной, и будет проходить литературное редактирование, верстку и корректуру. Публикация финальной версии статьи запланирована в номер 3/2021.

© 2021 НИУ ВШЭ

«Зеленая» цифровая трансформация в электроэнергетике

Юлия Туровец

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

Лилиана Проскурякова

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

Алена Стародубцева

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

Институт статистических исследований и экономики знаний Национального исследовательского университета «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

Затяжной экономический спад, который переживает мировая экономика в связи с пандемией COVID-19, позволяет переосмыслить основы и драйверы экономического роста и заложить основы устойчивого развития. «Зеленое» посткризисное восстановление экономики происходит при ведущей роли топливно-энергетического комплекса. В статье проанализировано распространение и возможные эффекты «зеленых» цифровых технологий в электроэнергетике в десяти странах мира, которые являются крупнейшими производителями и потребителями электроэнергии. Исследование выполнено в рамках концепции отраслевых инновационных систем. Для целей исследования были проанализированы научные и аналитические публикации (сканирование горизонтов). Кроме того, на основе данных официальной статистики и других надежных и доступных данных для выбранных стран было проведено сопоставление ключевых показателей «зеленой» цифровизации в электроэнергетике. Также был проведен сравнительный анализ национальных документов стратегического планирования отрасли и выявлены ключевые задачи и показатели цифровизации на уровне компаний. В результате исследования были определены ключевые направления и выявлены три модели «зеленой» цифровизации отрасли на национальном уровне, оценены предпосылки и потенциальные социально-экономические эффекты внедрения цифровых технологий в электроэнергетике.

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

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

Alyona Starodubtseva

Research Assistant, Laboratory for Science and Technology Studies, aestarodubtseva@edu.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 world economic downturn due to COVID-19 pandemic allows decision-makers and societies to re-think the economic growth basis and drivers, laying the foundation for sustainable development. Green economic recovery takes place with the leading role of the energy industry. The 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 frame of the sectoral innovation systems concept. The research tasks were addressed, first, through horizon scanning (the analysis of research and analytical publications). Second, 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 digital transformation at micro level. As a result of the study key trends and three models of green digitalization at national level were identified, the prerequisites and potential social and economic effects of these technologies application in electric power industry.

Keywords

Digital technologies; green technologies; energy industry; sustainable recovery; Internet of Energy; smart grid

Введение

Затяжной экономический спад, который переживает мировая экономика в связи с пандемией COVID-19, позволяет переосмыслить основы и драйверы роста, обеспечить долговременное снижение негативного воздействия на окружающую среду и климат, заложить основы устойчивого восстановления и развития. Цифровизация отраслей, которая началась еще до пандемии, в 2020 году ускорилась и стала основным трендом. Эти изменения направлены на повышение технологической и экономической эффективности, рост производительности труда, повышение точности планирования и снижение аварийности. С учетом необходимости достижения целей в сфере охраны окружающей среды и изменения климата, цифровизация также служит задачам «зеленого» роста [Midttun, Piccini, 2017; IEA, 2020b; Montevercchi et al., 2020].

Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) играет важную роль в «зеленом» посткризисном восстановлении экономики [Barbier, 2020; Noussan et al., 2021]. Принимая во внимание растущую долю электроэнергии в конечном потреблении, а также особенности развития ТЭК, особое внимание уделяется электроэнергетике [IEA, 2020a; IRENA, 2019]. Экономический потенциал цифровизации этой отрасли (рост добавленной стоимости), с 2016 по 2025 годы оценивается в 1.3 трлн долл. [WEF, 2016].

Для электроэнергетики актуальны многие из трендов и факторов, оказывающих влияние на другие отрасли ТЭК: опережающий прирост генерации и инвестиций в ВИЭ, стимулирование энергосбережения и энергоэффективности при одновременном росте спроса на энергоресурсы, выстраивание новых отношений между энергетическими компаниями и потребителями благодаря «умным» электрическим сетям и Интернету энергии.

Растущая опережающими темпами доля электроэнергии в мировом энергобалансе позволяет прогнозировать уверенный рост многих связанных с отраслью рынков. Цифровые технологии будут способствовать повышению эффективности электрогенерации (например, при реализации комплекса решений «цифровая подстанция»), снижению потерь при передаче электроэнергии, особенно на дальние расстояния, прогнозированию и оптимизации потоков энергии. Цифровые решения для управления спросом на электроэнергию позволят снизить нагрузку в пиковые часы и сократить расходы на электроэнергию крупных потребителей. Аналогичным образом, благодаря «умным» счетчикам и другим технологиям оптимизации энергопотребления, смогут экономить и домохозяйства.

При этом, достижение 7-й Цели устойчивого развития ООН, направленной на переход к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии¹ к 2030 г., не гарантировано, и для многих стран связано с обеспечением энергетически бедных регионов электроэнергией, вырабатываемой из местных «чистых» источников, строительством «умных» мини- и микросетей для повышения надежности энергоснабжения и эффективной интеграции ВИЭ в сеть.

Мировой тренд на ускоренное развитие распределенной, автономной и индивидуальной генерации актуален и для России. Многие промышленные компании переходят на собственную генерацию: их доля в общем производстве электроэнергии составила более 5% в 2018 году и продолжает расти темпами около 3% в год² [Минэнерго России, 2019]. Развитие и снижение себестоимости новых технологий аккумулирования электроэнергии большой мощности будут и дальше усиливать этот тренд. Аналогичным образом, крышные солнечные панели и солнечно-ветровые установки для личного пользования становятся все более доступными по цене. Развитие этих мировых трендов в России, одновременно с изменением географии присутствия крупных промышленных производств, создает риски при планировании и строительстве объектов генерации, особенно с учетом уже имеющегося избытка мощности.

С учетом мирового тренда на переход к «зеленой» экономике, в первую очередь за счет повышения ресурсоэффективности и расширения использования чистых источников энергии, ключевую роль играют стратегии цифровизацией ТЭК, в первую очередь, электроэнергетики. В научной литературе пока отсутствует единый подход к оценке этого феномена в традиционных отраслях [OECD, 2019a], а существующие исследования указывают на необходимость комплексного подхода к рассмотрению особенностей цифровизации на различных уровнях [IEA, 2017; OECD, 2019b].

Теоретической основой настоящего исследования является концепция отраслевых инновационных систем (*sectoral innovation systems*), широко применяемая для изучения технологий в различных секторах [Malerba, 2002]. Цель исследования — выявление основных характеристик и эффектов распространения «зеленых» цифровых технологий в сегменте передачи и распределения электроэнергии на национальном (отраслевом) уровне. Для достижения этой цели были выявлены основные технологические тренды этого процесса, которые создали базу для дальнейшего сравнительного анализа трансформации отрасли в десяти странах мира, лидирующих по объему производства электроэнергии (Китай, США, Индия, Россия, Япония, Канада, Германия, Бразилия, Южная Корея, Франция). По результатам

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.

анализа были выявлены три модели цифровой трансформации электроэнергетики на национальном уровне, а также основные предполагаемые эффекты этого процесса.

Основные направления «зеленой» цифровизации в электроэнергетике

Цифровизация традиционных отраслей экономики является относительно новой, но динамично развивающейся сферой исследований. В последние годы наблюдается существенный рост научных и аналитических публикаций по этой теме [Beier et al., 2017; Müller et al., 2018; Teece, 2018]. Данный тренд анализируется в рамках более широких концепций и феноменов, таких как Индустрия 4.0, «умное» производство, Интернет вещей, киберфизические системы, платформенная экономика [Kang et al., 2016; Ghobakhloo, 2018; Kamble et al., 2018]. Эффекты цифровых технологий существенно варьируют ввиду отраслевой специфики, общеэкономических и страновых характеристик.

Цифровая трансформация наблюдается во всех отраслях ТЭК, включая электроэнергетику [Afanasyev et al., 2020; Mika, Goudz, 2020; Ratnam et al., 2020]. Особенности этого процесса связаны с инфраструктурным характером отрасли, значимыми экономическими и социальными эффектами, и растущей потребностью в услугах электроснабжения со стороны новых и возникающих секторов, сегмента хранения и обработки данных [Gatto, Drago, 2020; Tripathi, Kaur, 2020]. Одновременно с этим на развитие электроэнергетики оказывают существенное влияние регуляторные ограничения, обусловленные глобальными экологическими вызовами [Newberry, 2001; Cavanagh, 2021]. Цифровые технологии формируют технологическую базу для более эффективного использования ресурсов и в дальнейшем расширения доли возобновляемых источников энергии [Kamble et al., 2018; Menzel, Teubner, 2020].

Цифровизация в электроэнергетике призвана обеспечить модернизацию централизованных сетей, в т.ч. для автоматизации сделок по покупке и продаже энергии, повышения эффективности работы энергетических сетей, их технического обслуживания, предоставления новых сервисов. Кроме того, цифровые технологии — интеллектуальная основа для создания децентрализованных энергетических систем, работающих преимущественно на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ) [Graf, Jacobsen, 2021; BDEW, 2019].

К числу основных технологических трендов отрасли относятся распространение «умных» (активно-адаптивных) сетей и датчиков, Интернет энергии (*Internet of Energy*), виртуальные электростанции (*Virtual Power Plants*) и цифровые подстанции, решения на основе систем распределенных реестров (*distributed ledger and blockchain*), цифровые платформы в электроэнергетике и маркетплейсы [Dellermann et al., 2017; Ketter et al., 2018; Adeyemi et al.,

2020; Menzel, Teubner, 2020]. Каждое из направлений включает набор различных цифровых технологий, которые зачастую применяются комплексно [KAS, 2020].

«Умные» сети представляют совокупность решений, направленных на обеспечение надежности и эффективности электроэнергетических сетей путем интеграции в единую среду различных типов устройств генерирующих организаций, поставщиков энергии и потребителей [Ketter et al., 2018; Bertolini et al., 2020]. Технологическим ядром таких сетей являются «умные» счетчики, которые позволяют отслеживать в режиме реального времени объем потребления и передают эту информацию поставщику, который, в свою очередь, принимает решение об оптимизации использования объектов инфраструктуры. Для потребителя ключевыми преимуществами является возможность управления энергопотреблением [Waite et al., 2017; Ketter et al., 2018]. К «умным» устройствам также относят датчики для контроля качества электроэнергии (Bagdadee et al., 2020), контроля потерь на линиях электропередач [Song et al., 2017], сенсорного мониторинга подземной инфраструктуры [Rodríguez et al., 2020], автоматизации принятия решений по управлению системой [Wertani et al., 2020], решения для мониторинга состояния оборудования [Dileep, 2020] и др.

Широкое применение в отрасли находят технологии распределенных реестров и, в частности, блокчейна, обеспечивающего защищенную цифровую среду [Carvalho, 2015; Adeyemi et al., 2020; Zhu et al., 2020]. С точки зрения традиционных источников энергии и цепочек создания стоимости системы распределенного реестра применяются для мониторинга и контроля операционных процессов, в т.ч. функционирования устройств для регулирования напряжения и частоты энергосети, а также выявления отклонений. Так, информационные системы на основе блокчейна контролируют текущее состояние распределительной сети, предотвращают перебои в снабжении и непредвиденные ситуации [Shahidehpour, Fotuhi-Friuzabad, 2016]. Смарт-контракты автоматизируют взаимодействие между участниками за счет безопасного проведения транзакций и управления цифровыми активами (токенами), автоматизации биллинга, управления идентификацией и доступом участников рынка с использованием современных алгоритмов шифрования [Andoni et al., 2019; Adeyemi et al., 2020].

В рамках развития новых сегментов электроэнергетики и, в первую очередь, ВИЭ технологии распределенных реестров обеспечивают мониторинг процессов на всех этапах цепочки создания стоимости и способствуют более широкому вовлечению потребителей, которые среди прочего получают возможность продавать излишки произведенной ими электроэнергии в сеть (концепция просьюмеров) [Zhu et al., 2020]. Получили широкое распространение цифровые валюты для проведения сделок с энергоресурсами, которые снижают роль посредников при передаче электроэнергии конечному потребителю. Примерами специальных цифровых валют

на основе блокчейна, которые используются для расчетов за энергоресурсы, являются SolarCoin, EverGreenCoin, EcoCoin, EECoin, NRGcoin [Andoni *et al.*, 2019]. Однако пока такие проекты реализуются в пилотном режиме [Adeyemi *et al.*, 2020]. В перспективе потенциальным объектом торговли могут стать права на выбросы углекислого газа, что особенно актуально на фоне ужесточения климатического законодательства [Andoni *et al.*, 2019].

Создаваемая инфраструктура ВИЭ включает виртуальные электростанции, которые обеспечивают общий стабильный объем генерации и предложение электроэнергии. Это объединенные в единую систему с помощью открытых интерфейсов и других инструментов управляемые оператором небольшие генерирующие объекты [Dellermann *et al.*, 2017].

Цифровые платформы в электроэнергетике позволяют снизить риски для отдельных участников и предоставлять различные сервисы в зависимости от задач и числа участников. К ним относятся платформы, объединяющие розницу и конечных потребителей (B2C), конечных потребителей (C2C), платформы совместного пользования (*plug-sharing platforms*), для подзарядки электромобилей и гибридных транспортных средств с возможностью передачи электроэнергии обратно в сеть (*vehicle-to-grid*, V2G) и ряд других. Их ключевое преимущество — регулирование нагрузки сети за счет повышения гибкости управления. Операторы платформ регулируют деятельность участников, роли которых могут существенно меняться в современной архитектуре. Так, коммунальная компания на различных платформах может выступать продавцом, провайдером услуги или покупателем электроэнергии [Menzel, Teubner, 2020].

Вместе с явными преимуществами цифровизация отрасли сопряжена с рядом ограничений, включая повышенные требования к информационной безопасности, значительные капитальные инвестиции с длительным периодом окупаемости, сложности интеграции новых устройств в действующую инфраструктуру [Edelstein, Kilian, 2007]. Помимо этого, технологические новации и более широкое участие потребителей в процессах управления спросом требуют освоения новых знаний и компетенций, повышения цифровой грамотности.

Темпы цифровизации отрасли в значительной мере зависят от качества регулирования и зрелости рынка, которые охватывают вопросы сохранности и защиты данных, информационной безопасности обмена данными, обеспечения совместимости информационных систем и оборудования [Eiphanidou *et al.*, 2020; Anderson, El Gamal, 2017; European Commission, 2017]. Новой сферой регулирования является формирование правовых основ и принципов вовлечения потребителей в процесс торговли энергоресурсами. Активно ведется разработка отраслевых стандартов использования новых технологий [Afanasyev *et al.*, 2019]. Отдельной задачей

является определение правил обработки и хранения больших объемов данных организаций отрасли [Adeyemi et al., 2020].

Внедрение цифровых технологий потребует от компаний повышения эффективности. По некоторым прогнозам, к 2025 г. один из четырех поставщиков электроэнергии может обанкротиться в результате цифровизации [Schwieters et al., 2016; Menzel, Teubner, 2020]. Использование цифровых технологических платформ может привести к смене инвестиционной модели, заключающейся в переходе от ограниченного числа крупных инициатив к портфелю небольших проектов на стороне потребления [Menzel, Teubner, 2020]. Значительные изменения ожидаются также на рынке труда. По мнению некоторых исследователей, влияние цифровых технологий сопоставимо с последствиями либерализации рынка и сокращением рабочих мест. К примеру, в Германии в период реформы в 1998–2007 гг. занятость в электроэнергетике снизилась на 20% [Graf, Jacobsen, 2021].

Как отмечено выше, в настоящее время подходы к изучению цифровой трансформации в отраслях находятся на этапе становления, что открывает возможности для апробации различных количественных и качественных методов анализа [European Commission, 2019b; Zaouia, Souissi, 2020]. Большинство исследований посвящены применению отдельных цифровых технологий и их технико-экономическим аспектам [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], а также институциональным преобразованиям отдельно на уровне отрасли и на национальном уровне [Dellermann et al., 2017; Menzel, Teubner, 2020; Graf, Jabobsen, 2021]. Вместе с тем, сопоставительные исследования, охватывающие различные аспекты и эффекты цифровизации, носят единичный характер. Настоящее исследование восполняет этот пробел, объединяя тенденции, проблемы и наилучшие решения в сфере трансформации электроэнергетики.

Концептуальной основой исследования является подход отраслевых инновационных систем (*sectoral innovation systems*) [Malerba, 2002]. Для анализа «зеленой» цифровой трансформации применялся набор методов из менеджмента, сравнительной политологии и исследований будущего (форсайта) сканирование горизонтов, анализ кейсов, экспертные интервью, опросы сотрудников компаний, занимающих руководящие должности, анализ доступных сопоставимых статистических данных.

По итогам сканирования горизонтов выявлены тренды и направления будущего развития «зеленой» цифровизации отрасли, в т. ч. с использованием научных публикаций. Для этого были отобраны научные статьи в ведущих журналах в области электроэнергетики за 2017–2020

гг., в которых представлены тенденции технологического развития отрасли.³ На этом этапе также были использованы прогнозные аналитические и экспертные материалы международных организаций и ведущих мировых аналитических центров.

Для выявления национальных инициатив в области цифровизации проведен сравнительный анализ стратегических и программных документов десяти стран-крупнейших производителей и потребителей электроэнергии: Китай, США, Индия, Россия, Япония, Канада, Германия, Бразилия, Южная Корея и Франция (табл. 1). Сбор информации проводился по следующей структуре: страна; название документа, в котором содержатся мероприятия, связанные с внедрением цифровых технологий в отрасли; ключевые направления государственной политики развития отрасли электроэнергетики, инструменты поддержки цифровизации отрасли.

С учетом имеющихся теоретических и практических подходов [*Brown, Brown, 2019; Korachi, Bounabat, 2019; Lichtenthaler, 2020*], были выявлены два этапа цифровой трансформации отрасли и дана характеристика их реализации в выбранных странах. Также был сформирован перечень основных количественных индикаторов цифровизации отрасли. В качестве источников информации использованы данные Всемирного банка [World Bank, 2021], Управления по 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 цифровизации электроэнергетики и может быть применен для иных отраслей ТЭК.

Национальные приоритеты «зеленой» цифровизации

Роль государства на текущем этапе развития технологий в отрасли сводится не только к стимулированию цифровизации, но и к смягчению ее возможных негативных последствий таких, как сокращение занятости в отрасли [*Graf, Jacobsen, 2021*], рост сложности систем управления [*Ahl et al., 2020*], риски сохранности данных [*Dellerman et al., 2017*], увеличение регуляторной нагрузки на компании и неопределенность правового регулирования [*Soshinskaya et al., 2014*].

Выбранные для анализа страны – крупнейшие экономики мира, которые лидируют по абсолютному объему производства электроэнергии. В ближайшие десять лет эти страны сохраняют ведущие позиции по данному показателю (табл. 1).

³ Отбор статей осуществлялся 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. (базовый сценарий), ТВт	Объем производства электроэнергии в 2030 г. (сценарий энергоперехода), ТВт
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: сформировано авторами на основе [Enerdata, 2020; IEA, 2020f; IRENA, 2020].

В качестве источников информации по каждой стране были использованы доступные отраслевые документы, включая стратегии развития, отраслевые планы и концепции, аналитические материалы и доклады, освещающие технико-экономические и технологические аспекты, законодательные акты, регулирующие внедрение и использование отдельных технологий, установление тарифных схем и ряд других. Большинство документов датировано 2015–2020 гг. Обзор документов позволил выявить основные характеристики цифровизации и инструменты государственной политики.

В большинстве стран основой цифровой трансформации являются «умные» сети. Внедрение иных цифровых технологий (Интернет вещей, искусственный интеллект, облачные технологии, цифровые двойники и др.) обычно закреплено в национальных цифровых стратегиях, в связи с их сквозным характером и широким охватом отраслей. В ряде стран, в частности в России, повестка цифровизации электроэнергетики представлена отдельным документом.

Китай является мировым лидером по объемам энергопотребления и производства чистой энергии, которая достигла 30% в общем объеме выработанной электроэнергии. Инвестиции в цифровизацию направлены на повышение гибкости сетевой инфраструктуры для интеграции электроэнергии из возобновляемых источников. Кроме того, ставится цель обеспечить более гибкую работу электростанций на ископаемых видах топлива, управление спросом и масштабные системы хранения. С учетом быстрого распространения электрокаров в Китае, существует возможность интеграции электроэнергетики и данного сегмента «умного» транспорта. Основные риски связаны с недостижением амбициозных целей перехода к чистой энергетике и углеродной нейтральности (к 2060 г.), с учетом высокого (и растущего)

энергопотребления. Для преодоления рисков стране потребуется опробовать и масштабировать все возможные инструменты цифровизации [IEA, 2019a].

В ближайшее десятилетие США останется в числе крупнейших потребителей и производителей электроэнергии. При этом газовая генерация продолжит доминировать, доля ВИЭ расти, а доля угольной генерации существенно снизится. Все типы электростанций и энергосистемы должны будут существенно повысить эффективность, что может быть достигнуто благодаря цифровизации, рациональному использованию ресурсов (бережливому производству, *lean production*) и внедрению передовой аналитики на основе больших данных. Оптимизация рабочих процессов, ремонт по состоянию, цифровизация процессов, гибкое управление (*agile working*) позволят коммунальным предприятиям повысить эффективность на три процента, снизить себестоимость производства электроэнергии (исключая топливную составляющую) на 10–20 процентов для угольных электростанций и на 5–15 для газовых, при одновременном повышении безопасности [McKinsey & Company, 2019]. Основные риски связаны с потерей рабочих мест и отсутствием квалифицированного персонала для вновь создаваемых «цифровых» рабочих мест в энергетике, а также с обеспечением надлежащего уровня кибербезопасности с учетом высокого достигнутого уровня цифровизации. Как и в Канаде, регионы (штаты) обладают высоким уровнем автономии в части выбора доминирующих технологий генерации и цифровизации, что влечет сложности в части обеспечения их интеграции.

В связи с высокими темпами роста экономики Индии, ожидается, что через несколько лет она выйдет на первое место в мире по объему энергопотребления, обогнав Китай. До сих пор энергопотребление базировалось на использовании угля и нефти, при этом, страна импортирует более 80% используемой нефти. Для удовлетворения спроса и снижения зависимости от импорта ускоренными темпами растет солнечная генерация, и цифровизация способствует ее интеграции в сеть. Национальные приоритеты цифровизации охватывают цифровизацию сетевого хозяйства (благодаря внедрению системы мониторинга переходных процессов, гибким системам передачи электроэнергии переменным током и др.), автоматизации и проектированию цифровых подстанций (в 2019 г. в стране работали более 50 цифровых подстанций), цифровизации распределения энергии (благодаря передовым системам управления — SCADA, ADMS и др.), поддержке просьюмеров и активных потребителей [Batra, 2019]. Основные риски связаны с высоким уровнем бедности и высокой зависимостью от импортируемого топлива (нефти) при быстро растущей экономике.

В России доминируют газовые ТЭС, а доля ВИЭ составляет менее 1% централизованной генерации энергии. Отраслевые инициативы в области электроэнергетики реализуются в

контексте более широкой повестки цифровизации, заданной в 2019 г. национальной программой «Цифровая экономика Российской Федерации»⁵. Ее реализация предполагает комплексное развитие информационной инфраструктуры, кадров, цифровых технологий, информационной безопасности, нормативно-правовой среды для разработки и использования цифровых решений в экономике и обществе, а также переход к цифровому государственному управлению. Наряду с этим принят отдельный ведомственный проект Минэнерго России «Цифровая энергетика», согласно которому основные задачи цифровизации отрасли в России включают повышение уровня надежности энергоснабжения потребителей, создание единой отраслевой цифровой платформы для передачи данных в реальном режиме времени и обеспечение сбора отраслевой отчетности⁶. Основные риски в России связаны с высоким уровнем централизации и преимущественным развитием единой энергосистемы, большим числом организаций-посредников, и высоким уровнем перекрестного субсидирования, что замедляет и затрудняет 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 году доминировала нефть (около 40%), за которой следуют газ (21%) и уголь (26%). ВИЭ и гидроэнергия составляют 10%. Доля генерации электроэнергии на АЭС сократилась с 30% в 2011 г. до 3% в 2018 г. [IEA, 2020d]. После инцидента на Фукусиме, который повлек значительные проблемы в национальной электросети, а также с учетом социальных вызовов (прежде всего, старение населения) в стране началась постепенная реорганизация электроснабжения на базе цифровых технологий. В 2016 г. была принята стратегия социально-экономического развития «Общество 5.0» (Society 5.0)⁷. В части энергетики предполагается использовать технологии искусственного интеллекта для анализа разнородных больших данных: метеорологических, о работе электростанций, состоянии батарей электромобилей, и особенностях потребления энергии каждого домохозяйства. Перечисленные данные позволят точно предсказывать и оптимизировать энергопотребление, удовлетворять его за счет местных источников (включая электромобили и водород), повышать энергосбережение и снижать нагрузку на окружающую среду и климат. Согласно Национальному стратегическому плану (Strategic Energy Plan), на структуру энергопотребления окажут значительное влияние технологии искусственного интеллекта, Интернета энергии, виртуальной и дополненной реальности и другие. Кумулятивный эффект применения цифровых технологий, систем хранения энергии и ВИЭ позволит стране достичь климатических целей декарбонизации

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.

экономики. Среди рисков энергоперехода для Японии можно отметить нарастающее политическое влияние Китая и Индии, ужесточение технологической конкуренции и риски в сфере кибербезопасности [METI, 2018].

В Канаде в структуре первичного энергопотребления по 30% составляют нефть и природный газ, 25% гидроэнергия, по 3-4% уголь и ВИЭ, остальное — атомная энергия. При этом, при производстве электроэнергии доминируют гидроэнергетика (составляя около 60%). По объему произведенной гидроэлектроэнергии страна уступает только Китаю и Бразилии [EIA, 2019]. В канадской стратегии энергоперехода подчеркивается, что комбинированное применение технологий чистой энергетики и цифровых технологий вносит вклад в снижение затрат и выбросов [The Generation Energy Council, 2018]. Среди приоритетов цифровизации отрасли до 2050 года – повышение энергоэффективности и управление спросом, управление энергопотреблением, модернизация сетей («умные» сети), выстраивание инфраструктуры для электромобилей и подготовка специалистов. Основные риски в Канаде, как и в других странах с широким применением цифровых технологий и электрификации экономики, связаны с обеспечением кибер-безопасности. Кроме того, в число рисков включается обеспечение резилентности (устойчивости к внешним шокам) отрасли [Canadian Electricity Association, 2019].

Страны Европейского союза – Германия, Франция, Испания и другие – руководствуются Европейской стратегией цифровизации (The European Digital Strategy), которая опирается на принципы открытости, общественного участия, устойчивого развития (включая климатическую повестку), конкуренции и социальной справедливости [European Commission, 2021b]. Цифровизация в энергетике направлена на повышение связности, эффективности, надежности и устойчивости энергосистем. Это станет возможным благодаря использованию технологий ИКТ, современных сенсоров, больших данных, искусственного интеллекта и Интернета вещей [European Commission, 2021a]. Цифровизация электроэнергетики требует гармонизации двух стратегических документов – «Энергетического союза» (Energy Union)⁸ и «Цифрового единого рынка» (Digital Single Market)⁹.

В Германии в общем объеме потребления первичных ресурсов доминирует нефть (34% в 2018 году), природный газ (23%) и ВИЭ (14%). Страна поставила самые амбициозные в ЕС цели по декарбонизации экономики и переходу к чистым источникам энергии, в т.ч. при помощи цифровых технологий, таких как «умные» счетчики [Gangale et al., 2017]. Ключевые документы - закон о цифровизации энергетического перехода (The Act on the Digitisation of the Energy

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.

Transition) [BMW, EY, 2019] и дорожная карта энергосетей будущего (Roadmap for smart energy grids of the future) [BMW, 2017]. Среди рисков — поддержание надежности системы с учетом роста доли ВИЭ (в т. ч. благодаря переходу к активно-адаптивным сетям), соответствие требованиям защиты персональных данных и обеспечение интероперабельности цифровых решений [BMW, 2017].

Бразилия удовлетворяет около 50% спроса на первичную энергию за счет нефти и около 30% за счет ВИЭ и атомной энергии. До 70% спроса на электроэнергию страна покрывает за счет гидрогенерации, и вырабатывает до 80% электроэнергии за счет ВИЭ. ТЭК Бразилии переживает масштабные реформы, которые могут изменить облик сектора в последующие десятилетия [WEF, Bain & Company, 2017]. Стратегия цифровой трансформации Бразилии “E-Digital”, принятая в 2018 году [Government of Brazil, 2018], предполагает развитие «умных» городов благодаря технологиям Интернета вещей, особенно в сферах «умной» мобильности, безопасности организаций ЖКХ и «умных» сетей электро- и водоснабжения. Все шире применяются «умные» счетчики, удаленные системы управления и автоматизированные системы генерации [WEF, Bain & Company, 2017], симуляторы в режиме реального времени и другие новые технологии, способные прогнозировать изменения, отслеживать их и формировать необходимые ответы [RRE, 2017]. Новые возобновляемые источники энергии (ветер и солнце) создают сложности для работы системного оператора Бразилии в части их интеграции в сеть и формирования децентрализованных энергосистем. Предполагается, что цифровизация должна способствовать решению этих задач. В документах также уделяется особое внимание защите критически важной национальной инфраструктуры – информационной (центры хранения данных, сервера и др.) и традиционной (электроэнергетика, водоканалы, нефтегазовый сектор и др.). Предполагается, что защита от киберугроз будет иметь высокий приоритет и выполняться совместными усилиями органов власти и частного сектора.

В энергобалансе Южной Кореи доминирует нефть и уголь, за которыми следуют природный газ и атомная энергия. В декабре 2017 года в Корее был принят «План действий по переходу к ВИЭ 3020» (Renewable Energy 3020 Implementation Plan), согласно которому планируется довести долю ВИЭ в общем объеме электроэнергии с 3% до 20% к 2030 г. [Hong et al., 2019; IEA, 2020e]. Для достижения этой цели в 9-м Плате долгосрочного развития электроэнергетики (9th Basic Plan for Power Supply and Demand) помимо конкретных шагов по наращиванию солнечной и ветрогенерации поставлены задачи повышения гибкости генерации, хранения, передачи и потребления энергии, поддержание высокого уровня безопасности электроснабжения. Цели цифровизации также обозначены в Мастер-плане развития энергетики до 2035 г. (Korea Energy Master Plan 2035) и Зеленой стратегии посткризисного восстановления (Green New Deal) 2020 г.

В частности, планируется перейти к управлению спросом за счет внедрения «умного» учета энергии, организацию «умной» сети и использование развитой ИКТ-инфраструктуры для повышения энергоэффективности [МОТIE, 2014]. Среди основных угроз — высокая зависимость от импорта ископаемых энергоресурсов, геополитическая изолированность электроэнергетической системы, удаленность центров генерации электроэнергии (юг страны) от центров потребления. Последнее характерно и для некоторых других стран, например, Германии.

Несмотря на различную структуру потребления первичных энергоресурсов и уровень технологического развития отрасли, почти во всех рассматриваемых странах цифровые технологии рассматриваются как основа повышения эффективности, более широкого использования чистых источников энергии и децентрализованных энергосистем.

Этапы и страновые модели цифровой трансформации в электроэнергетике

Исходя из проведенного анализа национальных документов, можно выделить три модели цифровизации на национальном уровне. Первая модель характерна для стран с децентрализованной системой управления, таких как США и Канада, в которых регионы (штаты, провинции) обладают достаточной автономией для принятия решений о выборе доминирующего вида электрогенерации и технологических решений в отрасли. Решения принимаются под влиянием рынка (*market pull*). Такой подход позволяет опробовать различные решения и выбрать наиболее эффективные с учетом региональных различий (ресурсов, плотности населения, климата и проч.). С целью обеспечения гармонизации региональных систем и решений, координирующую роль играют национальные отраслевые ассоциации. Для стран этой модели также характерно отсутствие дефицита различных видов энергоресурсов и высокий уровень экономического развития.

Вторая модель цифровизации наблюдается в странах с высокой зависимостью от импорта ископаемых энергоресурсов, таких как Индия, Корея, Япония и Германия. Для таких стран ускоренное развитие ВИЭ-генерации связано не только с климатическими и природоохранными целями, но и с повышением энергонезависимости (и энергобезопасности). В этом случае цифровизация призвана обеспечить стабильность и резилиентность энергосистем, быструю передачу энергии из центров генерации в центры потребления, радикальное повышение энергоэффективности. Для данной модели характерен подход с позиций продвижения технологий (*technology push*).

Третья модель — смешанная — опирается одновременно и на рыночные механизмы, и на директивное управление со стороны государства (в зависимости от сегмента электроэнергетики или области применения цифровых решений). Такая модель характерна для России, Китая, Бразилии. Несмотря на то, что государство определяет основные траектории цифровизации, у организаций отрасли и регионов сохраняется некоторая свобода выбора путей достижения заявленных целей.

В дополнение к предложенным моделям можно выделить два основных этапа цифровизации отрасли: первый предусматривает внедрение «умных» устройств (прежде всего, счетчиков) и создание «умной» инфраструктуры, тогда как второй затрагивает всю цепочку создания стоимости и обеспечивает переход к чистым источникам энергии. В первом случае речь идет о модернизации действующих электросетей и оборудования, повышение эффективности функционирования объектов и процессов компаний. Это достигается за счет повсеместной установки «умных» счетчиков и систем учета электроэнергии, а также совершенствования механизмов законодательного регулирования.

Несмотря на то, что внедрение «умных» счетчиков началось около десяти лет назад, эти процессы в ряде стран до сих пор не завершены в силу регуляторных барьеров и длительных сроков разработки стандартов [European Commission, 2011]. Такая ситуация характерна, например, для Бразилии. В США тарифная политика коммунальных предприятий замедляет развертывание крупных проектов по цифровизации [DOE, 2015]. К 2018 г. число умных счетчиков приближается к отметке 100 млн [BCSE, 2020]. Значительное время занимает стандартизация и законодательное обеспечение их применения.

В странах, где целевые показатели по «умным» счетчикам достигнуты, переходят к следующему этапу — установке «умных» сенсоров и датчиков нового поколения. Такая ситуация наблюдается в КНР, где ожидается очередной этап модернизации устройств ввиду их относительно короткого (5–8 лет) жизненного цикла. Этот процесс должен обеспечить стабильный внутренний спрос на «умные» устройства в объеме 55–60 млн в год [BMW 2020a]. В Канаде 82% всех электросчетчиков уже относятся к категории «умных» [Natural Resources Canada, 2018]. В Южной Корее первые «умные» счетчики были установлены в рамках пилотного проекта в 2009–2013 гг. в провинции Чеджудо, что позволило апробировать устройства и выйти с ними на внешние рынки Перу и Камбоджи [IEA, 2020f].

Второй этап предполагает системную трансформацию электроэнергетики благодаря цифровым технологиям и использованию «чистых» источников энергии, строительству распределенных энергосетей и инфраструктуры «умной» мобильности (включая электромобили), интеллектуальному энергообеспечению зданий, расширению спектра цифровых сервисов. В

данном случае задействован широкий набор передовых решений, включая предиктивную аналитику на основе алгоритмов машинного обучения, автоматизацию 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 процессы цифровизации вовлекаются потребители, поставщики и партнеры передающих и распределительных компаний.

Современная инфраструктура «умных» сетей позволяет предоставлять новые услуги конечным потребителям благодаря отслеживанию в онлайн-режиме объемов и структуры потребления энергии и формированию дифференцированных тарифов. Такой подход распространен во Франции, где схема Linky используется для управления низковольтной сетью, и, помимо возможности установления дифференцированных тарифов, обеспечивает более точный мониторинг и предиктивную диагностику, регулируя тем самым пиковые нагрузки [European Commission, 2020].

В Бразилии почасовой тариф (The White Hourly Tariff) позволяет отслеживать поведение потребителей и на основе этой информации стимулировать домохозяйства потреблять меньше энергоресурсов в пиковые часы с 18 до 22 часов [Dantas et al., 2018; Dranka, Ferreira, 2020]. Стране может потребоваться 2 млрд долл. инвестиций для повсеместной установки современных счетчиков [Dranka, Ferreira, 2020].

Второй этап связан с внедрением различных цифровых решений по всей цепочке добавленной стоимости, при этом большее внимание уделяется платформенным решениям. В качестве примера можно привести сквозной проект по созданию Интернета энергии китайской электроэнергетической госкорпорацией SGCC (e-IoT). В рамках проекта предполагается создание энергетической экосистемы, интегрирующей цифровые платформы, системы управления спросом и диспетчирования, а также иные приложения для достижения внутренней эффективности. На стороне потребителя будут разработаны сервисы по интеграции систем распределения электроэнергии и розничной торговли, новые модели торговли энергоресурсами в облачной среде [Energy Iceberg, 2019].

На каждом этапе цифровизации используются меры поддержки со стороны государства (табл. 2). Инструменты политики можно объединить в три группы — финансовые, регуляторные и иные (все остальные).

Табл. 2. Основные направления и меры поддержки цифровой трансформации электроэнергетики

Финансовые меры
<p><i>Исследования и разработки</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Фонды коммерциализации технологий для энергетики (США)* – Гранты на создание технологий для энергетики (Германия) – Налоговые льготы для проведения исследований (Индия) – Гранты на разработку и коммерциализацию проектов дорожной карты (ДК) «Энерджинет» Национальной технологической инициативы (Россия) – Создание и поддержка центров разработки передовых технологий, в т.ч. ИИ, технологий искусственного интеллекта – Частно-публичные платформы для создания центров превосходства в области энергетики (в т.ч. объединяют представителей академической науки и МСП) для проведения государственных ИиР по приоритетным направлениям (Франция) <p><i>Внедрение цифровых решений</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Гранты на модернизацию сетей передачи и распределения (Smart Grid Investment Grant program, США)* – Гранты (специальные кооперационные соглашения) для изучения возможностей нового поколения умных сетей (совмещения новых решений с действующей инфраструктурой) и технологий хранения электроэнергии (Smart Grid Demonstration Program, США)* – Субсидии на приобретение электромобилей (Китай) – Государственные закупки электромобилей для замены парка традиционных автомобилей (Индия) – Формирование отраслевых заказов на оборудование и иные устройства предприятий сектора (Россия) – Гранты на проекты по интеграции распределенных энергоресурсов, устройств хранения и электромобилей (Канада) – Призовые конкурсы по отбору компаний-лидеров реализации ИТ-стратегии (Япония) – Поддержка стартапов (Индия) – Фонды развития экспорта для коммерциализации решений компаний в области чистой энергетики (Канада) <p><i>Использование</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Дифференцированный тариф исходя из времени дня, времени года для регулирования пиковых нагрузок с помощью «умных» счетчиков (Франция)* – Специальный тариф для объединений на уровне регионов и муниципалитетов (пониженная ставка при передаче в пределах объединения, и более высокая — вовне (Франция)* – Специальные условия для внедрения умных счетчиков при использовании определенного вида тарифа (The White Hourly Tariff, Бразилия)*
Регуляторные меры
<ul style="list-style-type: none"> – Требование об обязательной сертификации умных устройств (счетчиков и концентраторов) (Германия, Франция, Япония)* – Регуляторные песочницы в рамках демонстрационных проектов для тестирования новых моделей предоставления услуг энергоснабжения (Южная Корея) – Законодательное требование о доступности данных, получаемых при передаче электроэнергии на розничном рынке (США) – Законодательное требование о наличии информационных систем управления безопасностью энергосистем (Германия) – Законодательно установленное право распределительных организаций об установлении на своей территории концессионных зарядных станций для электромобилей (Бразилия) – Доступ к различным наборам данным 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, в т.ч. формат, протокол данных для электросетевых предприятий (Green Button или the Energy Services Provider Interface standard) (Канада)
Иные меры
<p><i>Стандартизация</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Разработка стратегии стандартизации – дорожная карта разработки технических стандартов в

форме рекомендаций (Германия)

- Разработка стандартов кибербезопасности, в т.ч. требование сообщать об инцидентах, которые поставили под угрозу надежность, к тем, которые могут представлять будущую угрозу для системы) (США)
- Разработка Руководящих правил по совершенствованию безопасной работы промышленного интернета (Китай)
- Ежегодный мониторинг цифровизации (Германия)

Интегральные и платформенные решения

- Создание открытой, федеративной инфраструктуры данных для объединения централизованных и децентрализованных инфраструктур в однородную среду (Германия и Франция GAIA-X)
- Платформы для электронного получения услуг по присоединению к электрическим и газораспределительным сетям для потребителей (Россия)
- Платформы на основе блокчейна для торговли избыточной электроэнергией, маркетплейсы на основе 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, — правовой и физической инфраструктуре, т.е. без специальных нормативных изъятий (программа SINTEG, Германия)
- Пилотные и демонстрационные проекты по запуску платформ и мобильных приложений на блокчейне, микрогрид, облачных платформ (США, Китай, Южная Корея)
- Демонстрационные программы для поддержки проектов по созданию зарядной инфраструктуры электромобилей (Канада)
- Демонстрационные проекты по направлениям систем управления энергией для дома, система энергетического менеджмента здания, проекты smart community (экологически чистые города), проекты виртуальных электростанций (ВЭС) (Япония)
- Отбор лучших практик для запуска пилотных проектов и их дальнейшего масштабирования (Цифровая РЭС, Россия)

*Звездочкой отмечены те инструменты, которые могут использоваться на первом этапе цифровизации.

Источник: составлено авторами на основе [ЕС-МАР, 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].

Финансовые инструменты направлены на стимулирование проведения исследований и разработок, содействие внедрению новых технологий и их использованию как компаниями, так и потребителями. К ним относят гранты, субсидии, налоговые льготы на проведение исследований и разработок, создание специальных фондов для поддержки разработки и коммерциализации технологий, государственные закупки и субсидии на приобретение определенных продуктов (например, электромобилей), конкурсы, финансовая поддержка стартапов, специальные тарифы и условия при использовании «умных» устройств.

Примером финансового инструмента поддержки является запущенная в 2016 г. в России Национальная технологическая инициатива (НТИ) «Энерджинет», в рамках которой отобранные проекты могут получить грант на разработку и коммерциализацию решения. НТИ «Энерджинет» была спроектирована с учетом мировых трендов в области «умных» сетей и российских технологических заделов в этой области. Развитие цифровых решений «Энерджинет» в России будет способствовать сокращению объема потребления электроэнергии из ЕЭС. При наличии верных стимулов энергетической политики и конкуренции, эти решения

будут востребованы не только на российском, но и на мировых рынках. Прогнозируется, что к 2035 г. российские компании займут от 3 до 12% на глобальных рынках «Энерджинет»¹⁰, а объем выручки достигнет 40 млрд долл. в год¹¹.

Регуляторные инструменты охватывают законодательно закрепленные требования об обращении с устройствами, данными и процессами их использования. К ним относят правила сертификации устройств и обеспечения доступности данных, единые стандарты, организацию «регуляторных песочниц». К примеру, в Германии, Франции, Японии и других странах на законодательном уровне закрепляется требование о сертификации умных устройств [European Commission, 2019a].

Третья группа инструментов включает иные меры поддержки, в т.ч. рекомендательные стандарты разработки и внедрения технологических решений, кибербезопасности; набор индикаторов для мониторинга цифровизации; участие потребителей в создании платформ для получения услуг по обеспечению электроэнергией в электронном виде; построение открытых инфраструктур данных, цифровых платформ и маркетплейсов для торговли электроэнергией; развитие новых бизнес-моделей для поставки энергоресурсов, а также пилотные проекты.

На втором этапе цифровизации применяется более широкий набор инструментов поддержки ввиду значительного объема инноваций по всей цепочке создания стоимости. Одно из новых направлений регулирования — отраслевые данные и управление ими [Avancini et al., 2019]. В последние годы появился целый ряд инициатив, поддерживаемых национальными регуляторами.

Во Франции и Германии комплексный проект GAIA-X, реализуемый в форме международной некоммерческой ассоциации, предусматривает создание открытой, распределенной инфраструктуры данных для объединения централизованных и децентрализованных сетей в единую среду, разработку соответствующих регуляторных норм и услуг. Такой формат обеспечивает хранение данных, в т.ч. полученных с инфраструктурных объектов. Благодаря общим стандартам становится возможным объединить на общей платформе поставщиков облачных решений, высокопроизводительных вычислений, периферийных вычислительных систем и других участников, что расширяет функционал предоставляемых услуг. Проект создает условия для развития новых бизнес-моделей (Закон об электроснабжении арендаторов жилья¹²), создания центров обработки данных, услуг по агрегации данных и др. [BMW, 2020b].

¹⁰ Надежные и гибкие распределительные сети, интеллектуальная распределенная энергетика 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.

¹² Закон об электроснабжении арендаторов жилья делает его более привлекательным для потребителей (арендаторов), владельцев жилья и системных операторов, поскольку системные операторы получают доплату к ставке, оплачиваемой арендаторами, в размере от 2.2 до 3.8 центов за кВт*ч. Такая система стимулирует

Во многих странах идет активная работа по разработке регуляторных правил по обращению с данными в энергетике. К примеру, в США закреплено обязательство об обеспечении доступности данных, получаемых при передаче электроэнергии на розничном рынке [IEA, 2019b]. Аналогичное требование о доступе к различным видам данных о потреблении электроэнергии, сетевой инфраструктуре, метеоданным с помощью открытого интерфейса закреплено во Франции [Catapult Energy Systems, 2019].

Вне зависимости от модели объединение в единую сеть требует повышения качества информационной безопасности оборудования и программного обеспечения. В США, к примеру, действует стандарт кибербезопасности, который предписывает уведомлять о киберинцидентах, которые поставили под угрозу надежность и могут представлять потенциальную угрозу для системы [Federal Register, 2019]. В США и Канаде принят в 2011 г. Единый стандарт данных, в т.ч. формат и протокол данных для электросетевых предприятий, известный как Green Button (the Energy Services Provider Interface standard). Он позволяет обмениваться данными между коммунальным предприятием и потребителями с помощью специальных приложений [Natural Resources Canada, 2018].

Значительные ресурсы направляются на исследования и разработки в сфере «зеленой» цифровизации, проводимые государственными научными организациями и центрами превосходства, часто на основе государственно-частного партнерства. Больше разнообразие присутствует в части стимулирования населения к приобретению новых технологий. В Германии реализуется проект по внедрению систем хранения энергии совместно с солнечными батареями, подключенными к электросети. При этом индивидуальные системы генерации могут передавать в сеть не более 50% производимой электроэнергии. Механизм стимулирования компаний и потребителей – физических лиц основывается на двух инструментах — инвестиционный грант на 30% стоимости аккумуляторных батарей и кредит с низкой процентной ставкой на оставшиеся 70% стоимости. Данная схема применима к установке новых солнечных панелей и для модернизации уже действующих солнечных электростанций, номинальная мощность которых не превышает 30 кВт/пик, а срок службы — не менее пяти лет [DIW Berlin, 2013].

Приоритетным направлением развития отрасли практически во всех странах является *электромобильность*. Повышение привлекательности электромобилей обеспечивается с

использовать возобновляемую электроэнергию, производимую крышными солнечными панелями, установленными почти повсеместно, или комбинированными системами генерации электроэнергии и тепла. Ранее почти вся выработанная таким образом энергия поставлялась напрямую в сеть, и не потреблялась арендаторами из-за сложностей бизнес-модели по продаже электроэнергии пользователям и отсутствию стимулов у системных операторов. Новая бизнес-модель наиболее востребована в регионах с высокими тарифами за электроэнергию из сети, например, в Берлине или Гамбурге.

помощью субсидий на их приобретение. В Китае инфраструктура для электромобилей в 2019 г. уже достигла 500 тыс. точек зарядки, на 50% больше предыдущего года. При этом 50% всех электромобилей продаются в Китае [BMW, 2020a]. Приоритетным направлением являются электромобили, которые могут как заряжаться из сети, так и отдавать электроэнергию в сеть по принципу Vehicle-to-Grid (V2G) [Clement-Nyns et al., 2011; Bibak, Tekiner-Moğulkoç, 2021].

В крупнейшем немецком городе Гамбург проект «ELBE» направлен на установку более 7.4 тыс. «умных» зарядных станций для электромобилей по принципу распределенной системы. В качестве стимулирующей меры участники программы могут получить компенсацию на покупку оборудования или модернизацию сетей до сентября 2022 г. в размере 40–60% стоимости проекта. При этом ключевым условием является совместимость создаваемых станций с оператором электросетей города, что позволит регулировать объемы электроэнергии, в т. ч. в пиковые часы [IRENA, 2019; IEA, 2019c].

«Регуляторные песочницы» позволяют опробовать новые технологии в рамках специальных правовых условий. В электроэнергетике такие условия создаются для тестирования новых моделей предоставления услуг энергоснабжения [IEA-ISGAN, 2019]. «Живые лаборатории», напротив, предназначены для тестирования технологий с высоким уровнем готовности в реальных условиях, в т.ч. правовых [Ahl et al., 2020]. Примером «живой лаборатории» является программа SINTEG в Германии по апробации проектов инфраструктуры для ВИЭ-генерации в пяти регионах страны с целью дальнейшего масштабирования.

На стороне потребителя широко используются различные платформы для электронного получения услуг по присоединению к электрическим и газораспределительным сетям (Россия)¹³ [Минэнерго России, 2019b], для торговли избытками произведенной электроэнергии, маркетплейсы на основе данных операторов рынка (Япония, Франция) [SETIS, 2018].

Для сопоставления стран в части результативности политики в области «зеленой» цифровизации по результатам анализа литературы были выбраны следующие показатели: средняя продолжительность прекращений передачи электрической энергии [Adeyemi et al., 2020; Ahmad et al., 2021; Dileep, 2020], поскольку данный показатель характеризует уровень надежности услуг энергоснабжения; среднее значение потерь электроэнергии [Xiong et al., 2018; Leiden et al., 2021] поскольку этот показатель отражает состояние электросетевого оборудования, что в свою очередь влияет на скорость внедрения цифровых технологий; доля «умных» счетчиков от общего числа счетчиков [Adeyemi et al., 2020; Bertolini et al., 2020; Havle et al., 2019]; доля электромобилей от общего количества автомобилей в стране [Plötz et al.,

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

2017]; количество заправочных станций с возможностью зарядки электромобилей [Ahmad et al., 2021; Hirst, 2020]. Значения этих показателей для выбранных стран представлены в табл. 3.

Табл. 3. Показатели, характеризующие процессы «зеленой» цифровизации на национальном уровне

Показатель	КНР	США	Индия	Россия	Япония	Канада	Германия	Бразилия	Южная Корея	Франция	Испания
Средняя продолжительность прекращения передачи электрической энергии (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 числа счетчиков (%)	99 (2018)	57	1 (2019)	10 (2018)	67 (2018)	80 (2019)	15	-	-	22.2 (2018)	93.1 (2018)
Доля электромобилей от общего количества автомобилей 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 в общем объеме заправочных станций в стране (ед.)	808 00 (2019)	26 000 (2019)	250 (2019)	1612 (2019)	7 900 (2019)	5000 (2019)	27459 (2019)	-	-	24950 (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; ТЕРСО, 2015, World Bank, 2021] и данных Автостата (<https://www.autostat.ru/news/42999/>, дата обращения 19.02.2021).

Как видно из табл. 3, значения показателей «зеленой» цифровизации в десяти выбранных для анализа странах существенно отличаются. К примеру, средняя продолжительность прекращения передачи электрической энергии (мощности) находится в диапазоне от 21 мин. до 348 мин. Наименьшее значение — в Японии, наибольшее в Индии и США 317 и 348 мин. соответственно.

Потери электрической энергии при ее передаче также указывают на различную эффективность сетевого хозяйства в рассматриваемых странах. В Индии около трети всей вырабатываемой электрической энергии теряется в сетях при ее передаче, в Бразилии — 16%, в России — 11%. Наименьшее значение этого показателя в Японии и Германии — 4% и 4.5% соответственно. В

странах с переходной экономикой потери, как правило, составляют более 10%, в развитых — менее 5%.

Доля «умных» счетчиков в общем объеме установленных счетчиков также колеблется от 1% в Индии до 98–99% в некоторых европейских странах и КНР.

Наименьший разброс наблюдается по доле электромобилей: во всех рассматриваемых странах значение этого показателя не превышает 3% от общего числа автомобилей. Наибольшее значение в странах Евросоюза — Франция (2.7%) и Германии (2.96%). Однако, по абсолютным показателям лидирует КНР, как и по числу заправок станций для автомобилей этого типа.

В России значения показателей, представленных в таблице 3, значительно ниже стран, чем в странах ЕС. Продолжительность прекращений передачи электрической энергии на территории РФ для физических лиц регулируется нормативно-правовыми актами¹⁴ и составляет не более 24 часов подряд и 72 часов в год. Фактическая продолжительность прекращений передачи электрической энергии в 2019 г. составила «не более двух часов»¹⁵. Однако сообщения об аварийном прекращении подачи электроэнергии и их неблагоприятных последствиях в Красноярском крае¹⁶, Псковской области¹⁷ и других регионах часто появляются в СМИ. Нормативы потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям утверждаются Министерством энергетики РФ¹⁸. По мнению участников рынка, фактические технологические потери электрической энергии не превышают 11%.

На основе анализа документов национального и отраслевого уровня, можно выделить следующие потенциальные эффекты «зеленой» цифровизации: социальные, климатические, ценностные и эффекты в смежных отраслях. К социальным эффектам можно отнести снижение стоимости (доступность) новых технологий для просьюмеров, внедрение гибких тарифов для потребителей, сокращение периодов отключения электроэнергии, доступность электроэнергии для удаленных и изолированных территорий. К основным климатическим эффектам можно отнести снижение парниковых выбросов за счет более экономного и эффективного использования энергоресурсов и снижения выбросов парниковых газов в связи с переходом к чистым источникам. Ценностные эффекты включают изменение паттернов поведения потребителей, а также закрепление приоритета устойчивого развития (вместо экономического

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.

роста любой ценой) на национальном уровне. Эффекты в смежных отраслях включают новые сервисы в сфере мобильности и новые стандарты в строительстве.

Заключение

Отрасль электроэнергетики, по сравнению с другими отраслями ТЭК, демонстрирует наибольшие достижения в реализации процессов цифровой трансформации — от облачных платформ Интернета вещей и приложений в них до оптимизации всей цепочки производства и потребления. Можно сказать, что электроэнергетика в наибольшей степени продвинулась на пути к образу желательного будущего цифровой экономики, демонстрируя его достижимость.

Цифровизация, декарбонизация и децентрализация стали основными векторами развития энергетики в большинстве стран мира. Цифровые технологии открывают технологическую возможность перехода к новым бизнес-моделям и более широкому использованию возобновляемых источников энергии.

В результате исследования были выделены три страновые модели и два основных этапа цифровой трансформации отрасли. Рассмотренные модели различаются в зависимости от степени централизации принятия решений относительно цифровизации отрасли, зависимости от импорта энергоресурсов и ориентации на спрос или предложение технологий (*market pull – technology push*).

На основе анализа документов национального уровня были выявлены следующие группы эффектов: социальные, климатические, ценностные и эффекты в смежных отраслях. К первой группе можно отнести снижение стоимости и повышение доступности новых энергетических технологий. Это происходит благодаря развитию отрасли, конкуренции и государственной поддержке. Применение цифровых технологий в электроэнергетике способствует более рациональному потреблению ресурсов электроэнергетическими компаниями и конечными потребителями, а также обеспечивает более надежное и равномерное распределение энергоресурсов. Кроме того, анализ больших данных потребителей позволяет энергоснабжающим организациям формировать гибкие тарифы в зависимости от паттернов энергопотребления. Вследствие снижения издержек и ресурсоемкости компаний, также происходит снижение затрат и тарифов в целом. Децентрализованные системы делают электроэнергию доступной для жителей удаленных и изолированных территорий. Для компаний важны повышение экономической и технологической эффективности, что напрямую влияет на надежность и бесперебойность поставок электроэнергии потребителям. Помимо перечисленных

эффектов, можно заключить, что цифровизация электроэнергетики способствует устойчивому росту отрасли и экономики в целом.

На уровне целей страны и компании декларируют приверженность снижению антропогенного воздействия на окружающую среду и климат, хотя на операционном уровне не всегда напрямую связывают достижение этих целей с цифровизацией. Более рациональное использование ресурсов (например, снижение потерь при передаче электроэнергии), повышение энергоэффективности и переход к чистым источникам энергии безусловно указывают на связь процессов цифровизации и «зеленого» роста. Такой переход невозможен без изменения ценностных установок граждан и компаний, а также информационных и просветительских кампаний со стороны органов власти.

Переход к устойчивому развитию и цифровым технологиям означает изменения во многих отраслях и появление межотраслевых эффектов. Такие эффекты включают новые бизнес-модели, новые паттерны мобильности, «зеленые» стандарты в строительстве, и формирование новых сегментов в ИКТ-индустрии.

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

Список источников

- Adeyemi, A., Yan, M., Shahidehpour, M., Botero, C., Guerra, A. V., Gurung, N., & Paaso, A. (2020) Blockchain technology applications in power distribution systems. *The Electricity Journal*. Vol. 33. № 8. 106817.
- Afanasyev, V. Y., Lyubimova, N. G., Ukolov, V. F., & Shayakhmetov, S. R. (2019) Digitalization of energy manufacture: Infrastructure, supply chain strategy and communication. *International Journal of Supply Chain Management*. Vol. 8. № 4. P. 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*. Vol. 9. P. 2043-2047.
- 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*. Vol. 117. 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.
- Anderson, K., & El Gamal, A. (2017) Co-optimizing the value of storage in energy and regulation service markets. *Energy Systems*. Vol. 8. № 2. P. 369-387.
- 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*. Vol. 100. P. 143-174.

- 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*. Vol. 217. P. 702-715.
- Bagdadee, A. H., Hoque, M. Z., & Zhang, L. (2020) IoT Based Wireless Sensor Network for Power Quality Control in Smart Grid. *Procedia Computer Science*. Vol. 167. P. 1148-1160.
- Barbier, E. B. (2020) Greening the post-pandemic recovery in the G20. *Environmental and Resource Economics*. Vol. 76. № 4. P. 685-703.
- Batra P. (2019) Geo smart Energy - Building a National Integrated Management System. Режим доступа: <https://geosmartindia.net/speaker/presentions2019/geosmart%20energy%20building%20national%20integrated%20management%20system%20Pankaj%20Batra.pdf>, дата обращения 19.02.2021.
- BCSE (2020) Sustainable Energy in America. Режим доступа: <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. Режим доступа: https://www.bdew.de/media/documents/Pub_20190603_Energy-Market-Germany-2019.pdf, дата обращения 19.02.2021.
- Beier, G., Niehoff, S., Ziems, 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*. Vol. 4. № 2. P. 227-234.
- Bertolini, B., Buso, M., Greco, L. (2020) Competition in smart distribution grids. *Energy Policy*, 145, 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*. Vol. 36. P. 1-20.
- BMWi (2017) Electricity 2030 - Concluding Paper. Режим доступа: <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/electricity-2030-concluding-paper.html>, дата обращения 03.02.2021.
- BMWi (2020a) China Energy Transition Status Report 2020. Sino-German Energy Transition Project. Режим доступа: https://www.energypartnership.cn/fileadmin/user_upload/china/media_elements/publications/China_Energy_Transition_Status_Report.pdf, дата обращения 03.02.2021.
- BMWi (2020b) GAIA-X: Driver of digital innovation in Europe. Featuring the next generation of data infrastructure. Режим доступа: https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/gaia-x-driver-of-digital-innovation-in-europe.pdf?__blob=publicationFile&v=8, дата обращения 03.02.2021.
- BMWi, EY (2019) Barometer Digitalisierung der Energiewende Wichtige Voraussetzungen für die Digitalisierung wurden geschaffen Berichtsjahr 2019. 2019. Режим доступа: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/barometer-digitalisierung-der-energiewende-berichtsjaehr-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. *Proceedings of ACM SAICSIT conference*. P. 8.
- Business standard (2019) Nearly 400,000 electric vehicles in India, UP leads race. Режим доступа: 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. Режим доступа: 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. P: Pages 202-216.
- Carvalho, P. (2015) Smart metering deployment in Brazil. *Energy Procedia*. Vol. 83. P. 360-369.

- Catapult Energy Systems (2019) A strategy for a Modern Digitalised Energy System. Режим доступа: <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*. Vol. 34. № 2. 106908.
- Center on Global Energy Policy (2019) Electric Vehicle Charging In China And The United States. Режим доступа: https://energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/file-uploads/EV_ChargingChina-CGEP_Report_Final.pdf, дата обращения 19.02.2021.
- Clement-Nyuns, K., Haesen, E., & Driesen, J. (2011) The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid. *Electric Power Systems Research*. Vol. 81. № 1. P. 185-192.
- D'Entremont C. (2020) Why 80 Per Cent of Canadians Are Already Using Smart Meters. Режим доступа: <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.
- Dellermann, D., Fliaster, A., & Kolloch, M. (2017) Innovation risk in digital business models: the German energy sector. *Journal of Business Strategy*. Vol. 38. № 5. P. 35-43.
- 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*. Vol. 123. P. 220-231.
- Dileep, G. (2020) A survey on smart grid technologies and applications. *Renewable Energy*. Vol. 146. P. 2589-2625.
- DIW Berlin (2013) Policy Efforts for the Development of Storage Technologies in the U.S. and Germany. Режим доступа: <https://d-nb.info/1153062666/34>, дата обращения 19.02.2021.
- DOE (2015) United States Electricity Industry Primer. Режим доступа: <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. Режим доступа: 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*. Vol. 136. 111033.
- ЕС-МАР (2018) New Policy For An Era Of Energy Digitalization: Power. Режим доступа: <http://ec-mar.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. Режим доступа: <https://repec.cepr.org/repec/cpr/ceprdp/DP6507.pdf>, дата обращения 19.02.2021.
- EIA (2019) Canada. Country analysis. Overview. Energy Information Administration, Режим доступа: <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? Режим доступа: <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. Режим доступа: <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. Режим доступа: 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. Режим доступа: <https://www.electricalindia.in/transmission-losses-in-india/>, дата обращения 13.02.2021.
- Enerdata (2020) Global Energy Statistical Yearbook 2020. Режим доступа: <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. Режим доступа: <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. Режим доступа: <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. Springer, Cham. P. 319-345.
- European Commission (2011) Smart Grids: from innovation to deployment. Режим доступа: <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. Режим доступа: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/eecsp_report_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. Режим доступа: 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. Режим доступа: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC116179/jrc_digital_transformation_final_on_line_en_baja_resoluci%c3%b3n_online.pdf, дата обращения 09.02.2021.
- European Commission (2020) Integrated National Energy and Climate Plan for France. Режим доступа: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/fr_final_necsp_main_en.pdf, дата обращения 19.02.2021.
- European Commission (2021a) Digitalisation. Режим доступа: https://ec.europa.eu/energy/topics/technology-and-innovation/digitalisation_en, дата обращения 09.02.2021.
- European Commission (2021b) The European Digital Strategy. Режим доступа: <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. Режим доступа: <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. Режим доступа: <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. Режим доступа: <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. JRC. Режим доступа: 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. Режим доступа: 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*. Vol. 172. 106527.
- Ghobakhloo, M. (2018) The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*. Vol. 29. № 6. P. 910-936.
- Government of Brazil (2018) Brazilian Digital Transformation Strategy E-Digital. Режим доступа: <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*. Vol. 68. 101107.
- Havle, B., Dursun, M. (2019) Digital Transformation In Energy Industry: A Literature Review for Future Studies. 2019 3rd International Conference on Data Science and Business Analytics.
- Hirst, D. (2020) Electric vehicles and infrastructure. Briefing Paper. Number CBP07480.
- 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. P. 425-437.
- IEA (2017) Digitalisation and Energy. Режим доступа: <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. Режим доступа: 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. Режим доступа: <https://webstore.iea.org/download/summary/2829>, дата обращения 09.02.2021.
- IEA (2019c) Project ELBE (incentive programme for EV charging infrastructure). Режим доступа: <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. Режим доступа: 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. Режим доступа: 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. Режим доступа: 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. Режим доступа: <https://www.iea.org/countries/japan>, дата обращения 09.02.2021.
- IEA (2020e) Korea. Режим доступа: <https://www.iea.org/countries/korea>, дата обращения 09.02.2021.
- IEA (2020f) World Energy Outlook 2020. Режим доступа: <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. Режим доступа: 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. Режим доступа: 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. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi. Режим доступа: 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*. Vol. 117. P. 408-425.
- 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*. Vol. 3. № 1. P. 111-128.
- KAS (2020) Sustainable Energy and Digitalisation: Practices and Perspectives in Asia-Pacific. Режим доступа: <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)*. Vol. 9. № 3. P. 1-22.
- Korachi, Z., & Bounabat, B. (2019) Towards a Maturity Model for Digital Strategy Assessment. *International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development*. P. 456–470.
- Krisher T. (2020) Plug it in: Electric car charging station numbers are rising. *AP News*, 31.07.2020. Режим доступа: <https://apnews.com/article/business-u-s-news-technology-detroit-electric-vehicles-0dbe44f4626fcfd6b3ccee274980188e#:~:text=There%20are%20now%2026%2C000%20electric,wit h%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.
- Lichtenthaler, U. (2020) Building blocks of successful digital transformation: Complementing technology and market issues. *International Journal of Innovation and Technology Management*. Vol. 17. № 1. P. 1–14.
- 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*. Vol. 31. № 2. P. 247-264.
- McKinsey & Company (2019) Unlocking the value of digital operations in electric-power generation. Режим доступа: <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 sustainabilization in the energy sector. *International Journal of Energy Sector Management*.
- METI (2018) Strategic Energy Plan. Режим доступа: 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. Режим доступа: 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*. Vol. 108. P. 330-343.
- 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*. P. 1-71.
- Montevecchi, F., Stickler, T., Hintemann, R., Hinterholzer, S. (2020) Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market. Final Study Report. Vienna. Режим доступа: 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. Режим доступа: 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*. Vol. 10. № 1. P. 247.
- Naik A.R. (2020) The Math Behind India's Electric Vehicle Charging Infrastructure. Режим доступа: <https://inc42.com/features/the-math-behind-indias-electric-vehicle-charging-infrastructure/#:~:text=According%20to%20a%20MarketWatch%2C%20at,expected%20to%20withn ess%20massive%20growth>, дата обращения 113.02.2021.
- Natural Resources Canada (2018) Smart Grid in Canada. Режим доступа: <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*. Emerald Group Publishing Limited.
- 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*. Vol. 13. № 1. P. 298.
- OECD (2019a) A measurement roadmap for the future. in *Measuring the Digital Transformation: A Roadmap for the Future*. OECD Publishing. Paris. Режим доступа: www.oecd.org/going-digital/measurement-roadmap.pdf, дата обращения 09.02.2021.
- OECD (2019b) Vectors of Digital Transformation Oecd Digital Economy Papers. <https://www.sipotra.it/wp-content/uploads/2019/03/VECTORS-OF-DIGITAL-TRANSFORMATION.pdf>, дата обращения 14.02.2021.
- Plötz, P., Sprei, F. Gnnann. T. (2017) What are the effects of incentives on plugin electric vehicle sales in Europe? ECEEE 2017 Summer Study – Consumption, Efficiency & Limits.
- Ratnam, K. S., Palanisamy, K., & Yang, G. (2020). Future low-inertia power systems: Requirements, issues, and solutions-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 124. 109773.
- Rivard G. (2019) Over 40,000 Plug-In Cars Sold in Canada. Режим доступа: <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*. Vol. 316. 112417.
- RRE (2017) Digitalization in the Brazilian Energy Sector: Time for Disruption? Режим доступа: <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 energievorsorger werden digital”, PricewaterhouseCoopers. Режим доступа: <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. Режим доступа: 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. Режим доступа: <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*. Vol. 23. № 6. P. 2862-2873.
- Smart Energy International (2020) OSIsoft helps Japanese utility launch digital transformation journey. Режим доступа: <https://www.smart-energy.com/industry-sectors/digitalisation/osisoft-helps-japanese-utility-launch-digital-transformation-journey/>, дата обращения 19.02.2021.
- Smart Energy International (2020) Smart metering in US reaches 57% penetration. Режим доступа: <https://www.smart-energy.com/industry-sectors/smart-meters/smart-metering-in-us-reaches-57-penetration>, дата обращения 10.02.2021.
- Song, E. Y., FitzPatrick, G. J., & Lee, K. B. (2017) Smart sensors and standard-based interoperability in smart grids. *IEEE sensors journal*. Vol. 17. № 23. P. 7723-7730.
- Soshinskaya, M., Crijns-Graus, W.H.J., Guerrero, J.M. and Vasquez, J.C. (2014) “Microgrids: experiences, barriers and success factors”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 40. P. 659-672.
- Statista (2021a) Electric car market share in Japan 2010-2019. Режим доступа: <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/ Режим доступа: <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. Режим доступа: <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*. Vol. 47. № 8. P. 1367-1387.
- TEPCO (2015) TEPCO Power Grid.Режим доступа: <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, Режим доступа: https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/CoucilReport_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*. Vol. 17. № 4. P. 525-547.
- Waite, M., Cohen, E., Torbey, H., Piccirilli, M., Tian, Y., & Modi, V. (2017) Global trends in urban electricity demands for cooling and heating. *Energy*. Vol. 127. P. 786-802.
- WEF (2016) Electricity: uncovering value through digital transformation. Режим доступа: <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. Режим доступа: 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*. Vol. 33. № 6. art. 106784.

- World Bank (2021) Electric power transmission and distribution losses (% of output). Режим доступа: <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.
- Zaoui, F., & Souissi, N. (2020) Roadmap for digital transformation: A literature review. *Procedia Computer Science*. Vol. 175. P. 621-628.
- 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*. Vol. 19. № 1. P. 33-41.