

Научная статья**УДК 338.24****DOI: 10.25683/VOLBI.2024.66.914****Mikhail Viktorovich Kozhevnikov**

Doctor of Economics, Associate Professor,
Head of the Department of Energy Industry
and Industrial Enterprise Management Systems
of the Graduate School
of Economics and Management,
Ural Federal University
Ekaterinburg, Russian Federation
m.v.kozhevnikov@urfu.ru

Lyudmila Sergeevna Myshkina

Candidate of Engineering,
Associate Professor of Automated
Electric Power Systems Department,
Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation
lsmyshkina@gmail.com

Михаил Викторович Кожевников

д-р экон. наук, доцент,
зав. кафедрой систем управления энергетикой
и промышленными предприятиями
Института экономики и управления,
Уральский федеральный университет
имени первого президента России Б. Н. Ельцина
Екатеринбург, Российская Федерация
m.v.kozhevnikov@urfu.ru

Людмила Сергеевна Мышкина

канд. техн. наук,
доцент кафедры автоматизированных
электроэнергетических систем,
Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Российская Федерация
lsmyshkina@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ НА РЕГИОНАЛЬНУЮ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКУ

5.2.3 — Региональная и отраслевая экономика

Аннотация. Электроэнергетика является критической инфраструктурой, оказывающей непосредственное влияние на социально-экономическое развитие субъектов Российской Федерации, возможности страны к проведению модернизации промышленности и достижения технологического суверенитета. Одной из важнейших задач развития электроэнергетической отрасли на современном этапе является ее интеллектуализация, которая предполагает изменение производственных моделей и способов взаимодействия энергетических компаний с потребителями на основе прогрессивных цифровых технологий. Реализация цифровых решений и автоматизации процессов проявляются на различных уровнях энергосистемы: от эксплуатации, технического обслуживания и ремонта производственных активов до стратегического планирования. Цель исследования заключается в изучении влияния процессов цифровизации и интеллектуализации на электроэнергетику региона с позиций анализа получаемых системных экономических эффектов. В статье систематизированы основные тенденции цифровой трансформации отрасли и перспективные технологии, которые во многом опреде-

ляют возможности интеллектуализации региональных энергосистем и систем электроснабжения. Проанализированы кейсы создания цифровых районов электрических сетей и внедрения концепции управления спросом с применением агрегаторов управления спросом на электрическую энергию. Показано, что основные экономические эффекты интеллектуализации электроэнергетики выражаются в снижении стоимости электрической энергии на рынке на сутки вперед, а также в уменьшении капитальных и операционных затрат на обслуживание, модернизацию и ремонт регионального электросетевого комплекса. Теоретическая значимость исследования выражается в выявлении новых характеристик интеллектуальных энергосистем, задающих вектор цифровой трансформации электроэнергетики. Практическая значимость обусловлена разработкой направлений интеллектуализации энергетики региона с позиций достижения значимых системных эффектов.

Ключевые слова: интеллектуализация, цифровизация, регион, энергосистема, эффективность, доступность, бесперебойность, социально-экономическое развитие, цифровой район электрических сетей, агрегатор управления спросом

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10171, <https://rscf.ru/project/23-29-10171/> и гранта № р-57 Правительства Новосибирской области в Новосибирском государственном техническом университете.

Для цитирования: Кожевников М. В., Мышкина Л. С. Влияние интеллектуализации на региональную электроэнергетику // Бизнес. Образование. Право. 2024. № 1(66). С. 103—109. DOI: 10.25683/VOLBI.2024.66.914.

Original article**INFLUENCE OF INTELLECTUALIZATION ON REGIONAL POWER INDUSTRY**

5.2.3 — Regional and sectoral economy

Abstract. The electric power industry is a critical infrastructure that has a direct impact on the socio-economic development of the constituent entities of the Russian Federation, the country's ability to carry out industrial

modernization and achieve technological sovereignty. One of the most important tasks in the development of the electric power industry at the present stage is its intellectualization, which involves changing production models and ways of

interaction between energy companies and consumers based on advanced digital technologies. The implementation of digital solutions and process automation is evident at various levels of the energy system: from operation, maintenance, and repair of production assets to strategic planning. The purpose of the study is to study the impact of digitalization and intellectualization processes on the regional power industry from the perspective of analyzing the resulting systemic economic effects. The article systematizes the main trends in the digital transformation of the industry and promising technologies that largely determine the possibilities for intellectualizing regional energy systems and power supply systems. Cases of creating digital districts of electrical networks and introducing the concept of demand management using aggregators for managing the demand for electrical energy are analyzed. It is shown that the main

economic effects of intellectualization of the electric power industry are expressed in the reduction of the cost of electric power in the day-ahead market, as well as in a reduction of capital and operating costs for maintenance, modernization, and repair of the regional power grid complex. The theoretical significance of the article is expressed in the identification of new characteristics of smart energy systems that set the vector for the digital transformation of the electric power industry. The practical significance is due to the development of directions for intellectualizing the region's energy sector from the standpoint of achieving significant systemic effects.

Keywords: intellectualization, digitalization, region, energy system, efficiency, accessibility, uninterrupted operation, socio-economic development, digital region of electric networks, demand management aggregator

Funding: The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 23-29-10171, <https://rscf.ru/project/23-29-10171/> and grant No. r-57 of the Government of the Novosibirsk Region.

For citation: Kozhevnikov M. V., Myshkina L. S. Influence of intellectualization on regional power industry. *Biznes. Obrazovanie. Pravo = Business. Education. Law.* 2024;1(66):103—109. DOI: 10.25683/VOLBI.2024.66.914.

Введение

В условиях современных вызовов, выражающихся в необходимости ускоренного проведения модернизации промышленности, импортозамещения, достижения экономического роста за счет увеличения доли несырьевых товаров [1], существенно возрастает роль электроэнергетики. Состояние производственного аппарата этой инфраструктурной отрасли, ее способность осуществлять надежное энергоснабжение по приемлемым для потребителей разных категорий ценам по существу определяют потенциал развития других секторов экономики и социально-экономическое развитие регионов Российской Федерации.

Сегодня в электроэнергетике наблюдается смена организационно-экономического и технико-технологического укладов. Изменения в отрасли выражаются прежде всего в ее массовой интеллектуализации, внедрении цифровых технологий и автоматизации процессов на различных уровнях: от эксплуатации, технического обслуживания и ремонта производственных активов до стратегического планирования [2]. В электроэнергетике активно формируются новые модели взаимодействия производителей и потребителей электроэнергии, учитывающие, в том числе, противоположность интересов субъектов розничных рынков. В этой связи особо актуальной становится задача автоматизации управления технологическими процессами по всей отраслевой цепочке создания ценности: генерация — передача — распределение — сбыт — потребление, — эффекты которой в большей степени проявляются на уровне регионов при создании умных сетей [3; 4] как основы появления активных потребителей и интеллектуальных энергосистем.

Вышеперечисленное обуславливает **актуальность** исследования влияния интеллектуализации на региональную электроэнергетику.

В отечественной науке появляются исследования, посвященные отдельным аспектам интеллектуализации электроэнергетики. Решением данной проблемы занимаются, например, такие авторы, как И. О. Волкова, Н. И. Воропай, А. П. Дзюба, А. Ю. Макаров, Д. В. Холкин. В практической плоскости сформированы и реализуются соответствующие концепции по цифровой трансформации электросетевого комплекса, систем диспетчерского управления и рынков, а также Ведомственный проект Минэнерго России

«Цифровая энергетика» (<https://minenergo.gov.ru/node/14559>), целью которого является преобразование энергетической инфраструктуры Российской Федерации посредством внедрения цифровых технологий и платформенных решений для повышения эффективности и безопасности энергоснабжения. Тем не менее следует констатировать, что многие вопросы цифровизации и интеллектуализации электроэнергетики, в особенности в части взаимосвязей новых технических решений и получаемых экономических эффектов, как на уровне энергетического производства, так и в контуре электропотребления, остаются недостаточно изученными, что, на наш взгляд, усиливает **целесообразность** исследования и определяет его межотраслевой характер.

Научная новизна статьи заключается в выявлении системных эффектов интеллектуализации отрасли, проявляющихся на региональном уровне. **Теоретическая значимость** работы обусловлена системным анализом отраслевых кейсов цифровизации элементов региональной энергетики в контексте технологической модернизации и энергоперехода. **Практическая значимость** состоит в обосновании предложенных по внедрению конкретных, экономически обоснованных цифровых решений в региональных энергосистемах.

Цель исследования — изучение влияния процессов цифровизации и интеллектуализации на региональную электроэнергетику с позиций получаемых экономических эффектов. Для достижения цели сформулированы следующие **задачи**:

- выявить характерные признаки интеллектуальной энергосистемы;
- проанализировать экономическую эффективность отдельных проектов перехода к интеллектуальной энергосистеме;
- сформулировать предложения по направлениям цифровизации региональных энергосистем.

В качестве **методологической основы** исследования использован системный подход. Информационной базой являются труды отечественных и зарубежных ученых, посвященных: проблемам повышения эффективности систем электроснабжения; вопросам интеллектуализации и цифровизации электроэнергетики, концепциям цифровой трансформации в экономике и промышленности.

Основная часть

Международным энергетическим агентством вводится понятие интеллектуальной энергосистемы как совокупности объектов электрических сетей, комплексов управления и мониторинга на основе цифровых и информационных технологий, используемых от источников генерации до конечного потребителя [5]. Концепция такой системы основана на взаимной координации субъектов отрасли (генерирующих компаний, операторов электрических сетей, системного оператора и потребителей) и на учете внутренних (режим работы, физическое состояние основных фондов и др.) и внешних факторов (погода, изменения институциональной среды и др.), что позволяет обеспечить максимальную эффективность всей системы путем минимизации затрат и повышения ее надежности и экономичности в целом [5; 6].

В качестве важного признака интеллектуальной энергосистемы можно отметить интеграцию всех этапов производства, передачи и потребления электроэнергии на основе достижений в области мониторинга, диагностики и управления, объединяющих энергетическую и информационную инфраструктуру.

В России реализуется ряд проектов, стимулирующих цифровую трансформацию электроэнергетики и переход к интеллектуальным энергосистемам. Помимо уже обозначенного ведомственного проекта «Цифровая энергетика», существуют и другие, среди которых: «Цифровые системы дистанционного управления электросетевым оборудованием» [3], «Управление спросом и ценозависимое снижение потребления» [7], «Активные энергетические комплексы» [8], «Система управления производственными активами» [9].

Среди ключевых задач цифровизации электроэнергетики отмечаются следующие:

- внедрение риск-ориентированного управления ЕЭС и управления жизненным циклом активов на основе дис-

танционного управления или прогнозирования в режиме реального времени;

- создание единой технологической среды для сбора отраслевой отчетности на основе цифровых технологических данных для взаимодействия, обеспечивающего управляемость системы;

- создание общей информационной модели энергосистемы как для управления функционированием, так и управления развитием;

- создание единой отраслевой цифровой платформы, для целей передачи технологических данных в реальном режиме времени и обеспечение информационной безопасности;

- внедрение новых цифровых технологий и платформенных решений для взаимодействия с потребителями и оказания электронных услуг;

- формирование новой архитектуры электроэнергетики — *Internet of Energy* (интернета энергии), направленной на беспрепятственную интеграцию объектов распределенной энергетики.

Решение указанных задач сопровождается реализацией цифровых решений во всех секторах отрасли. Выделяют четыре группы цифровых решений: «Данные», «Эффективность работы с активами», «Взаимодействие с клиентами», «Гибкая энергетическая система». В табл. 1 на основе системного анализа процесса трансформации энергосистемы [5; 6; 8—12] структурированы цифровые решения каждой группы и отдельные примеры, позволяющие выявить наиболее перспективные направления.

Наиболее перспективной с позиции получения экономических эффектов на уровне энергосистемы страны и регионов является группа решений, связанная с гибкостью. Под гибкостью энергосистемы понимается способность с необходимой скоростью изменять свою структуру для обеспечения нормального развития и оптимизации режимов функционирования при возможных возмущениях [13; 14].

Таблица 1

Примеры цифровых решений

Группа решений	Назначение	Примеры технологий
Данные	Базовая часть всех цифровых процессов, основа любого решения	Внедрение трансформаторов тока, тепловизионных датчиков, системы мониторинга переходных процессов
Эффективность работы с активами	Оснащение производственных активов энергетических компаний цифровыми технологиями для оптимизации процессов их эксплуатации и обслуживания	Система управления производственными активами, система мониторинга и диагностики оборудования
Взаимодействие с клиентами	Организация взаимодействия с потребителями (относится прежде всего к зоне интересов энергосбытовых и сетевых компаний)	Платформы самообслуживания, личный кабинет, мобильное приложение для дистанционного получения данных, смарт-контракт
Гибкая энергетическая система	Учет функционирования новых объектов и субъектов отрасли: активных потребителей, просьюмеров, распределенной генерации, микрогрид	Активный энергетический комплекс, агрегатор управления спросом, режимная и противоаварийная автоматика для интеграции локальных энергосистем, автоматика сбалансированного отделения локальной энергосистемы

Традиционная энергосистема, функционирующая на апробированных, но морально устаревших технологиях, не позволяет интегрировать новые источники энергии, не поддерживает использование их полезных свойств, не дает получить системные эффекты, порождает множество избыточных транзакций. В этой связи переход к интеллектуальным энергосистемам, повышающим гибкость и надежность процесса энергоснабжения, становится приоритетной задачей. От интеллектуализации зависит как экономичность процесса энергоснабжения, так и возможность увеличения темпов комплексной модернизации электроэнергетики.

Экономическую эффективность интеллектуализации можно проанализировать на примере отдельных технологических проектов и решений. К наиболее крупным реализованным проектам, оказывающим значимое влияние на региональную энергосистему, относятся цифровой район электрических сетей (далее — РЭС) и агрегатор управления спросом.

Проекты создания цифровых РЭС стали одними из первых, нацеленных на интеллектуализацию электроэнергетики. Реализация цифрового РЭС включает внедрение технологий цифровых подстанций 35—110 кВт; активно-адаптивной сети, систем интеллектуального учета, комплексных

систем поддержки принятия решений, систем цифрового проектирования. Высокий уровень автоматизации обеспечивает наблюдаемость в режиме реального времени и позволяет реализовать функции самодиагностики и самовосстановления, вести интеллектуальный учет расхода электроэнергии. В результате интеллектуализации достигается снижение технических и коммерческих потерь в сетях на 10 и 80 % соответственно, сокращение времени на переключения при определении поврежденного участка составляет до 70 % [4; 9]. Снижение затрат на обслуживание и ремонт оборудования сетей оценивается экспертами в 20 %, что подтверждается реализованным в Башкирэнерго проектом [4].

В табл. 2 представлены отдельные результаты успешных проектов цифровизации районов электрических сетей: средние индексы длительности (SAIDI) и частоты (SAIFI) прерываний в работе системы и потери.

Таблица 2

Снижение показателей при реализации проектов цифровых РЭС, % (сост. по: [4; 9; 15])

Компания, РЭС	SAIDI	SAIFI	Потери
Цифровой РЭС (Янтарьэнерго)	44	34	54
Сосновский РЭС (Челябэнерго)	81	86	66
Орджоникидзевский РЭС (Пермэнерго)	79	84	55
Ильинский РЭС (Пермэнерго)	83	89	79

Исходя из достигнутых технических показателей реализации проектов цифровых РЭС, могут быть определены экономические эффекты. К примеру, годовой эффект снижения потерь при реализации цифрового РЭС в Янтарьэнерго составил более 110 млн кВт·ч, что обернулось экономией затрат на покупку электроэнергии на оптовом рынке в 240 млн руб.

Указанные эффекты предлагается относить к системным, т. к. они выражаются не только в снижении издержек электросетевой компании, но также приносят дополнительную выгоду потребителям, которая выражается в сокращении возможных ущербов и снижении темпов роста стоимости тарифов на передачу.

Проведенный анализ экономической эффективности цифровых решений в электроэнергетике на примере цифрового РЭС показал целесообразность реализаций соответствующих проектов и их инвестиционную привлекательность. Согласно данным (см.: [4; 9; 15]), дисконтирован-

ные сроки окупаемости проектов составляют от 5 до 9 лет, что в целом является нормой для отраслевых инвесторов и энергокомпаний.

На рис. 1 представлены обобщенные результаты реализации пилотного проекта цифровизации сетей в Башкирэнерго [4] за 7 лет. Планировавшиеся инвестиции проекта были увеличены более чем в 2 раза, при этом полученный эффект превысил ожидаемый в 5,2 раза и составил 2 469 млн руб. вместо ожидавшихся 473 млн руб. Представленные показатели экономической эффективности проекта [4] свидетельствуют о значимости и целесообразности масштабирования полученного опыта в других электросетевых компаниях.

Проект цифрового РЭС входит в программу «Цифровой трансформации 2030» группы компаний «Россети». Финансирование инвестиционных программ компании осуществляется только на 67 % за счет собственных средств [3]. Стоимостные параметры инвестиционной программы 2020—2024 гг. составляют 1 114 млрд руб. [3]. Согласно целевым показателям программы, интеллектуализация электрических сетей позволит к 2030 г. добиться сокращения потерь на 50 %, снижения CAPEX и OPEX — на 15 и 30 % соответственно. Реализация данных проектов оказывает непосредственное влияние на эффективность региональной энергетики, т. к. определяет уровень работоспособности, наблюдаемости и управляемости в региональных распределительных сетях, в наибольшей степени определяющих уровень бесперебойности электроснабжения конечных потребителей. Соответственно, реализация проекта сопровождается значимыми системными эффектами, наблюдаемыми в региональной энергетике.

Проекты управления спросом в энергосистеме с привлечением специализированных структур — агрегаторов — начали реализовываться с 2019 г. Появление на розничном рынке потребителей, способных гибко управлять своим потреблением, стало возможным при развитии систем интеллектуального учета электроэнергии, являющихся технологической основой функционирования интеллектуальных сетей [16]. За четыре года, с момента проведения Системным оператором первого отбора агрегаторов, объем управляемой мощности в рамках пилотных проектов увеличился более чем в 10 раз (рис. 2). Снижение отобранных объемов управляемого спроса в 2023 г. объясняется изменением правил функционирования агрегаторов, переходом на ежемесячные отборы и введением штрафов за невыполнение команд по снижению нагрузки.

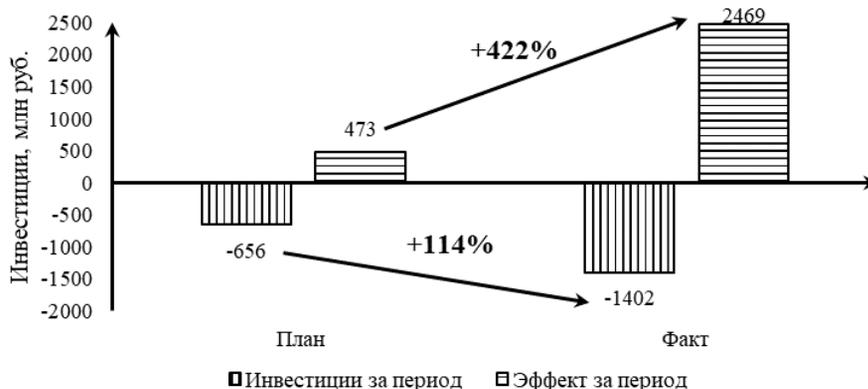


Рис. 1. Инвестиции и экономический эффект цифровизации районов электрических сетей в Башкирэнерго [4]

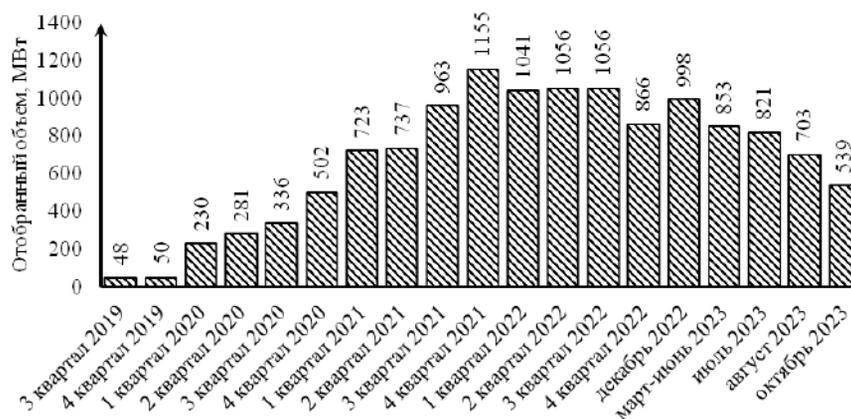


Рис. 2. Динамика изменения объемов управляемого спроса

Эффективность работы агрегаторов можно продемонстрировать посредством анализа отдельных событий. К примеру, 18 июля 2022 г. максимальный плановый объем разгрузки потребителей составил 618,518 и 201 МВт в первой и второй ценовых зонах соответственно. Как результат, максимальное снижение цены составило 31,8 руб./МВт·ч в первой ценовой зоне и 87,29 руб./МВт·ч — во вто-

рой. Суммарный эффект на рынке на сутки вперед составил 50,96 млн руб. Аналогичные результаты наблюдаются и при анализе других событий. Так, 4 октября 2023 г. эффект составил 90,59 млн руб.

Об эффективности можно судить на основе месячных совокупных эффектов работы агрегаторов управления спросом на рынке на сутки вперед (рис. 3).

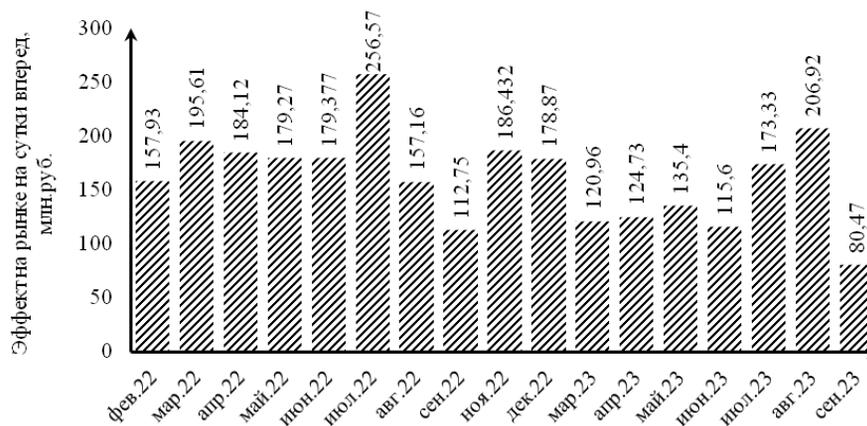


Рис. 3. Эффект управления спросом в 2022—2023 гг., млн руб.

Фактически, управление спросом и формирование новых субъектов — агрегаторов управления спросом — это высокотехнологичный бизнес, в который вовлечены специалисты в областях энерготрейдинга, информационных технологий, энергоаудита, энергоэффективности и интеллектуального учета [17]. Их появление и функционирование невозможно без цифровизации энергосистемы.

Цифровизация отрасли создает киберфизическую инфраструктуру и обеспечивает возможность перехода к эффективной интеллектуальной энергосистеме, обладающей свойствами наблюдаемости и управляемости.

Реализация проектов цифровой трансформации электроэнергетики на различных системных уровнях зачастую взаимосвязана между собой, т. к. основой работы является передача и обработка цифровых сигналов (данных) в целях повышения эффективности управления технологическими и бизнес-процессами в электроэнергетике.

К примеру, системы дистанционного управления основаны на автоматическом выполнении набора команд и обмене телеметрической информацией по цифровым каналам связи, что позволяет в несколько раз сократить длительность ввода в

работу и вывода из работы сетевого и генерирующего оборудования, по сравнению с технологией, основанной на голосовых командах диспетчерского персонала.

В то же время данные сигналы учитываются в системе управления производственными активами для более рационального и эффективного функционирования либо другими системами поддержки принятия решений.

Появление цифровых счетчиков электроэнергии, развитие телекоммуникаций и интеллектуальных сетей предопределили возможность повышения эластичности потребления и привели к появлению концепции управления спросом. «Насыщение» энергосистемы интеллектуальными приборами учета и контроля, а также системами дистанционного мониторинга и управления позволили реализовать управление спросом не только на уровне крупных потребителей оптового рынка, но и на розничном рынке — путем внедрения агрегаторов управления спросом на электрическую энергию.

Формирование активных энергетических комплексов основано на взаимодействии локальной системы и региональной системы энергоснабжения в режиме *on-line*, контроле множества режимных параметров и соответствующем управлении.

Увеличение количества и суммарной мощности распределенной генерации обуславливает необходимость в создании децентрализованной системы управления режимами распределительных сетей и источников энергии. Независимые системы управления объектами такой сети становятся агентами децентрализованной мультиагентной системы, которые осуществляют согласованное управление общим режимом сети без координирующих центров. Такие системы становятся инновационным ответом на технологии централизованного управления, обладающие низким уровнем адаптивности [18].

Системным оператором ЕЭС России реализуется также ряд других проектов по цифровой трансформации. Среди них — создание цифровой системы мониторинга и анализа функционирования устройств релейной защиты и автоматики, цифровой системы автоматического доведения плановой мощности до электростанций. Базой для всех проектов является формирование единой технологической экосистемы, использующей единые стандарты.

В ходе реализации программ цифровизации возникает потребность в развитой информационно-коммуникационной инфраструктуре, в цифровых платформах, обладающих значительными вычислительными мощностями. При этом энергосистема в достаточной степени должна быть оснащена «умными датчиками» для обеспечения наблюдаемости энергетических объектов, что формирует основу развития цифровых сервисов.

Неотъемлемой составляющей становится широкое внедрение интеллектуальных алгоритмов управления, систем прогнозирования остаточного ресурса элементов оборудования и объектов в целом как основы риск-ориентированного управления энергосистемой.

Выводы

Региональная электроэнергетика — критическая инфраструктура, состояние которой во многом определяет промышленное и социально-экономическое развитие субъектов Российской Федерации. Поэтому вопросы обновления отрасли на основе новейших научно-технических достижений, в т. ч. ее цифровизации и интеллектуализации, требуют большого внимания и неотложных решений.

Анализ кейсов внедрения цифровых решений позволил выявить получаемые системные эффекты, среди которых следует особо выделить повышение бесперебойности электроснабжения, управляемости и энергоэффективности процессов энергетического производства и потребления, снижение стоимости электроэнергии на рынке на сутки вперед для потребителей, а также снижение темпов роста тарифов на передачу электрической энергии. При этом, в силу специфики электроэнергетической отрасли, принимаемые решения прежде всего носят технологический характер, однако результаты реализации проектов демонстрируют их инвестиционную привлекательность.

Реализация проектов цифровой трансформации, направленных на повышение гибкости энергетической системы, внедрение передовых практик интеллектуальной энергетики, позволяет также повысить эффективность оптимизации режимов работы энергосистем, процессов эксплуатации, ремонта и замены оборудования в зависимости от его состояния, а следовательно, обеспечить снижение как капитальных и операционных затрат для энергокомпаний, так и общесистемных затрат, что важно с позиций устойчивого развития региональных систем электроснабжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гулин К. А., Якушев Н. О., Мазилев Е. А. Активизация экономического роста в регионах РФ на основе стимулирования развития несырьевого экспорта // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2018. Т. 11. № 3. С. 57—70. DOI: 10.15838/esc.2018.3.57.4.
2. Gitelman L. D., Kozhevnikov M. V. Adoption of technology platforms in the electric power industry: new opportunities // *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2022. Vol. 255. Pp. 23—34. DOI: 10.2495/EPM220031.
3. Цифровая трансформация 2030 : концепция / Россети. М., 2018. 31 с. URL: https://www.rosseti.ru/upload/iblock/582/gajp59pvuvjsx5ztr38jjz2q98o8rkbd/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf (дата обращения: 15.12.2023).
4. Макаров А. Ю. Цифровизация электрических сетей. Практический опыт. М. : Экономика, 2019. 128 с.
5. *Technology Roadmap: Smart Grids / International Energy Agency*. IEA, 2011. 48 p.
6. Трансформация электроэнергетики: тренды, модели, механизмы и практики управления : моногр. / И. О. Волкова, Е. Д. Бурда, Е. В. Гаврикова и др. Иркутск : Изд-во Иркут. нац. исслед. техн. ун-та, 2020. 354 с.
7. Управление спросом в электроэнергетике России: открывающиеся возможности : эксперт.-аналит. докл. / под ред. : Ф. Опадчий, Д. Холкин. М., 2019. 100 с.
8. Активные энергетические комплексы — первый шаг к промышленным микрогридам в России : эксперт.-аналит. докл. / под ред. Д. Холкина. Инфраструктур. центр EnergyNet, 2020. 58 с.
9. Постороение цифровых электрических сетей в Группе компаний «Россети» / Д. Гвоздев, В. Уколов, Д. Хижкин и др. // *Электроэнергия передача и распределение*. 2018. № 1(8). С. 2—9.
10. Иваненко О.Б., Головкина Е.В. Цифровая трансформация российской электроэнергетики: перспективы и ограничения // *Экономика, предпринимательство и право*. 2023. Т. 13. № 11. С. 5063—5076.
11. Botnar W. L., Frederico G. F. Industry 4.0 in the electric sector: Findings from a systematic review of the literature // *The Electricity Journal*. 2023. Vol. 36. Iss. 9—10. Art. 107337. DOI: 10.1016/j.tej.2023.107337.
12. Цифровизация как предчувствие Новые бизнес-практики в электроэнергетике / Д. Холкин, В. Сидорович, И. Чаусов и др. Инфраструктур. центр EnergyNet, 2020. 402 с.
13. Холкин Д. Управление энергетической гибкостью в России и мире // *Энергетическая политика*. 2022. 25 нояб. URL: <https://energypolicy.ru/upravlenie-energeticheskoy-gibkostyu-v-rossii-i-mire/energetika/2022/16/25/> (дата обращения: 09.12.2023).
14. Бойко Е. Е., Бык Ф. Л., Мышкина Л. С. Гибкость и энергоэффективность систем энергоснабжения // *Энергетик*. 2022. № 9. С. 24—28.
15. Меребашвили Т. А. Цифровая трансформации электроэнергетики России. М., нояб. 2020. URL: <https://www.digital-energy.ru/wp-content/uploads/2020/12/merebashvili-t.a.pdf> (дата обращения: 20.11.2023).

16. Бык Ф. Л., Мышкина Л. С. Развитие распределенной энергетики и повышение эффективности электрической сети // Бизнес. Образование. Право. 2019. № 4(49). С. 134—138. DOI: 10.25683/VOLBI.2019.49.421.
17. Дзюба А. П., Соловьева И. А. Перспективы управления спросом на энергоресурсы в регионах России // Экономика региона. 2021. Т. 17. Вып 2. С. 502—519. DOI: 10.17059/ekon.reg.2021-2-11.
18. Фишов А. Г., Осинцев А. А., Какоша Ю. В., Одинабеков М. З. Активные распределительные электрические сети с децентрализованным мультиагентным управлением режимом. Ч. 1 // Электричество. 2022. № 10. С. 14—24. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-10-14-24.

REFERENCES

- Gulin K. A., Yakushev N. O., Mazilov E. A. Promoting economic growth in regions of the Russian Federation by boosting the development of non-resource-based exports. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz = Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. 2018;11(3):57—70. (In Russ.) DOI: 10.15838/esc.2018.3.57.4.
- Gitelman L. D., Kozhevnikov M. V. Adoption of technology platforms in the electric power industry: new opportunities. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2022;255:23—34. DOI: 10.2495/EPM220031.
- Rosseti. Digital transformation 2030. Concept. Moscow, 2018. 31 p. (In Russ.) URL: https://www.rosseti.ru/upload/iblock/582/rajp59pvuvjsx5ztr38jjz2q98o8rkbd/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf (accessed: 12/15/2023)
- Makarov A. Yu. Power Grid Digitalization. Practical experience. Moscow, Ekonomika, 2019. 128 p. (In Russ.)
- International Energy Agency. Technology Roadmap: Smart Grids. IEA, 2011. 48 p.
- Volkova I. O., Burda E. D., Gavrikova E. V. et al. Transformation of the electric power industry: trends, models, mechanisms and management practices. Monograph. Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University publ., 2020. 354 p. (In Russ.)
- Demand management in the Russian electric power industry: emerging opportunities. Expert and analytical report. F. Opadchii, D. Kholkin (eds.). Moscow, 2019. 100 p. (In Russ.)
- Active energy complexes - the first step towards industrial microgrids in Russia. Expert and analytical report. D. Kholkin (ed.). Infrastructure center EnergyNet publ., 2020. 58 p. (In Russ.)
- Gvozdev D., Ukolov V., Khizhkin D. et al. Construction of digital electrical networks in the Rosseti Group of Companies. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electric power. Transmission and distribution*. 2018;1(8):2—9. (In Russ.)
- Ivanenko O. B., Golovkina E. V. Digital transformation of the Russian electric power industry: prospects and limitations. *Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo = Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*. 2023;13(11):5063—5076. (In Russ.)
- Botnar W. L., Frederico G. F. Industry 4.0 in the electric sector: Findings from a systematic review of the literature. *The Electricity Journal*. 2023;36(9—10):107337. DOI: 10.1016/j.tej.2023.107337.
- Kholkin D., Sidorovich V., Chausov I. et al. Digitalization as a premonition. New business practices in the electric power industry. Infrastructure center EnergyNet publ., 2020. 402 p. (In Russ.)
- Kholkin D. Managing energy flexibility in Russia and the world. *Energeticheskaya politika*. November 25, 2022. URL: <https://energypolicy.ru/upravlenie-energeticheskoy-gibkostyu-v-rossii-i-mire/energetika/2022/16/25/> (accessed: 09.12.2023)
- Boyko E. E., Byk F. L., Myshkina L. S. Flexibility and energy efficiency in power supply systems. *Energetik*. 2022;9:24—28. (In Russ.)
- Merebashvili T. A. Digital transformation of the Russian electric power industry. Moscow, November 2020. (In Russ.) URL: <https://www.digital-energy.ru/wp-content/uploads/2020/12/merebashvili-t.a.pdf> (accessed: 20.11.2023).
- Byk F. L., Myshkina L. S. Development of the distributed generation and improving the electric network efficiency. *Biznes. Obrazovanie. Pravo = Business. Education. Law*. 2019;4(49):134—138. (In Russ.) DOI: 10.25683/VOLBI.2019.49.421.
- Dzyuba A. P., Solovyeva I. A. (Prospects for Energy Demand Management in Russian Regions. *Ekonomika regiona = Economy of region*. 2021;17(2):502—519. (In Russ.) DOI: 10.17059/ekon.reg.2021-2-11.
- Fishov A. G., Osintsev A. A., Kakosha Yu. V., Odinabekov M. Z. Active Power Distribution Networks with Decentralized Multi-Agent Control Mode. Part 1. *Elektrichestvo*. 2022;10:14—24. (In Russ.) DOI: 10.24160/0013-5380-2022-10-14-24.

Статья поступила в редакцию 17.12.2023; одобрена после рецензирования 15.01.2024; принята к публикации 29.01.2024.
The article was submitted 17.12.2023; approved after reviewing 11.01.2024; accepted for publication 29.01.2024.