

## ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ СТАТЬЯ

<https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2023-1-13>

УДК 338.49

JEL L94

Ф. Л. Бык <sup>а)</sup> , Л. С. Мышкина <sup>б)</sup> , М. В. Кожевников <sup>в)</sup> <sup>а, б)</sup> Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация<sup>в)</sup> Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

## ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ РЕГИОНОВ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ<sup>1</sup>

**Аннотация.** Основой современного энергетического перехода на новый организационно-технологический уклад стало развитие распределенной энергетики, обеспечивающей повышение надежности, экономичности и экологичности региональных систем электроснабжения. Целью исследования является обоснование экономических преимуществ от интеграции локальных интеллектуальных энергосистем на базе распределенной энергетики в состав региональных систем электроснабжения. На основе эвристических и теоретических методов раскрыт генезис появления локальных интеллектуальных энергосистем, выявлены факторы, стимулирующие их развитие в регионах. Анализ эмпирических данных реализованных проектов локальных интеллектуальных энергосистем позволил выявить рост темпов распространения распределенной энергетики в различных сферах экономики региона и оценить размеры получаемых эффектов. Коммунальные локальные интеллектуальные энергосистемы имеют приоритет перед промышленными и сельскохозяйственными, поскольку именно их интеграция сопровождается значимыми для региона системными эффектами: повышение доступности электроэнергии для потребителей по общественно приемлемым ценам, ослабление перекрестного субсидирования, увеличение гибкости энергоснабжения на основе применения интеллектуальных технологий, создание благоприятных условий для функционирования малого и среднего бизнеса. Основным ограничением реализации проектов локальных интеллектуальных энергосистем является недостаточно развитая институциональная среда, с целью совершенствования которой рекомендованы изменения существующих правил оптового и розничного рынков электрической энергии и мощности. В частности, для обоснования изменений нормативно-правовой базы показана целесообразность включения локальных интеллектуальных энергосистем в региональные энергосистемы. В статье комплексно рассмотрены свойства и характеристики локальных интеллектуальных энергосистем, средства получения полезных экономических эффектов при развитии региональных систем энергоснабжения. Практическая значимость исследования обусловлена повышением инвестиционной привлекательности создания локальных интеллектуальных энергосистем для специализированных инвестиционных компаний и формированием условий устойчивого развития региона.

**Ключевые слова:** система электроснабжения, институциональная среда, распределенная энергетика, локальная интеллектуальная энергосистема, бесперебойность электроснабжения, доступность электроэнергии, экологическая безопасность

### Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20278, <https://rscf.ru/project/22-29-20278/> и гранта № р-19 Правительства Новосибирской области в Новосибирском государственном техническом университете.

**Для цитирования:** Бык Ф. Л., Мышкина Л. С., Кожевников М. В. (2023). Повышение устойчивости энергоснабжения регионов на основе локальных интеллектуальных энергосистем. *Экономика региона*, 19(1). С. 163-177. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2023-1-13>.

<sup>1</sup> © Бык Ф. Л., Мышкина Л. С., Кожевников М. В. Текст. 2023.

## RESEARCH ARTICLE

Felix L. Byk <sup>a)</sup> , Lyudmila S. Myshkina <sup>b)</sup>  , Mikhail V. Kozhevnikov <sup>c)</sup> <sup>a, b)</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation<sup>c)</sup> Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

## Improving the Stability of Power Supply in Regions on the Basis of Smart Local Energy Systems

**Abstract.** A modern organisational and technological structure of the energy sector emerged due to the development of distributed energy improving the reliability, efficiency and environmental friendliness of regional power supply systems. The study aims to substantiate the economic benefits of integrating smart local energy systems (SLES) based on distributed energy into regional power supply systems. Using heuristic and theoretical methods, the article explores the genesis of SLES and reveals factors that spur their development in regions. Analysis of empirical data from the implemented SLES projects revealed the accelerating pace of adoption of distributed energy by various regional economic sectors, allowing us to estimate the effects. Municipal smart local energy systems have a priority over those in agriculture and manufacturing, since their integration generates systemic effects significant for the region. These effects include increased availability of energy at socially acceptable prices, reduced cross-subsidisation, flexible energy supply through the use of smart technology, and better conditions for small and medium-sized enterprises. A key factor limiting the implementation of SLES projects is an underdeveloped institutional environment, which could be improved by changing the current rules of the wholesale and retail markets of electricity and capacity. In particular, it might be expedient to include SLES in regional energy systems in order to justify changes in the regulatory framework. The paper presents a comprehensive examination of the properties and characteristics of smart local energy systems and suggests ways to obtain useful economic effects in the development of regional power supply systems. As for the practical value, the research emphasises the appeal of SLES to investment companies and outlines conditions for a region's sustainable development.

**Keywords:** power supply system, institutional environment, distributed energy, smart local energy system, uninterrupted electricity supply, accessible and affordable electricity, environmental safety

### Acknowledgments

The article has been prepared with the support of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-29-20278, <https://rscf.ru/project/22-29-20278/> and grant No. r-19 of the Government of the Novosibirsk Region in Novosibirsk State Technical University.

**For citation:** Byk, F. L., Myshkina, L. S. & Kozhevnikov, M. V. (2023). Improving the Stability of Power Supply in Regions on the Basis of Smart Local Energy Systems. *Ekonomika regiona / Economy of regions*, 19(1), 163-177, <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2023-1-13>.

### Введение

Развитие современной энергетики все в большей мере будет происходить в русле нового энергетического перехода, предполагающего освоение эколого- и энергоэффективных технологий производства энергии (Quint et al., 2019; Voropaï, 2021; Makarov et al., 2021), что соответствует глобальным целям устойчивого развития. Повышение управляемости энергосистем на всех уровнях должно стать основой повышения эффективности и обеспечения бесперебойности функционирования энергетической инфраструктуры и систем энергоснабжения регионов (Куклин и др., 2013; Княгин & Холкин, 2017).

Актуальной задачей модернизации электроэнергетики является повышение гибкости систем электроснабжения — способности

к адаптации к различным внешним возмущениям, включая сохранение технологической доступности и информационной открытости для потребителей при изменении спроса на объем энергии, которую принято характеризовать уровнем их интеллектуализации<sup>1</sup>. Этим обусловлено появление концепций Smart Grid и Microgrid, базирующихся на использовании распределенных энергоресурсов, требующих внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ), систем накопления энергии, технологий управления спросом, распространение платформ энергетических транзакций для про-

<sup>1</sup> Sector Coupling in Europe: Powering Decarbonization. Potential and Policy Implications of Electrifying the Economy. 2020. URL: <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Sector-Coupling-Report-Feb-2020.pdf> (дата обращения: 12.06.2022).

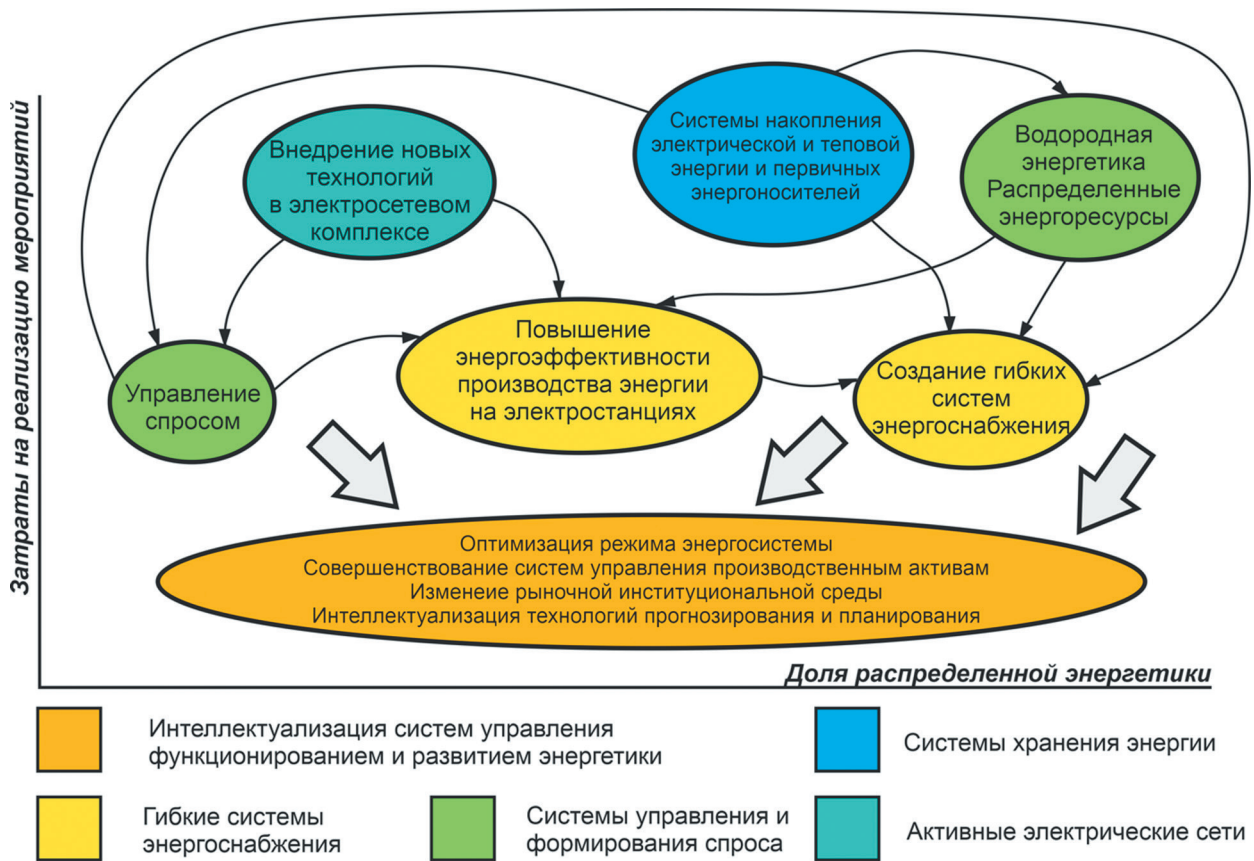


Рис. 1. Технологии повышения гибкости системы энергоснабжения  
 Fig. 1. Technologies for increasing the flexibility of the power supply system

сьюмеров — активных потребителей, являющихся равноправными участниками энергетического рынка (Дзюба & Соловьева, 2021; Power System Flexibility..., 2018; Recaldea & Alvarez-Alvarado, 2020; Huty et al., 2020; Tungadio et al., 2017; Tungadio & Sun, 2020; Abbey et al., 2014; Smart Electrification with Renewables..., 2022).

На рисунке 1, обобщающем ряд авторитетных работ по проблеме гибкости энергоснабжения (Power System Flexibility..., 2018; Smart Electrification with Renewables..., 2022; Бушуев, 2019; Воропай и др., 2019), показана взаимосвязь различных технологий, применяющихся для решения данной задачи в разных странах; технологии при этом ранжированы по величине затрат, связанных с их внедрением, и необходимости наличия развитой распределенной генерации в регионе.

Аналогичные процессы наблюдаются и в России. В нашей стране к Microgrid относят локальные энергосистемы, которые могут быть интегрированы в системы централизованного электроснабжения (СЦЭ). Процесс их интеграции предполагает наличие интеллектуальных систем управления, что обуславливает появление локальных интеллектуальных энергосистем (ЛИЭС). Под ЛИЭС понимается энерго-

район, содержащий источник электрической энергии мощностью до 25 МВт и распределительную сеть генераторного напряжения с системой управления, обеспечивающей расширение множества нормальных и послеаварийных схемно-режимных состояний. ЛИЭС представляет объект распределенной энергетики, способный работать как в режиме параллельной работы с региональной СЦЭ, так и в изолированном (островном, автономном) режиме на принципах самобаланса по тепловой и электрической энергии и мощности. С позиций надежности ЛИЭС характеризуются повышением бесперебойности электроснабжения потребителей, входящих в состав энергосистемы.

Ключевыми отличиями ЛИЭС являются «клиентоориентированность» электроснабжения, высокая интеллектуализация системы управления, способная обеспечить эффективное функционирование во всем многообразии схемно-режимных условий работы. Развитие ЛИЭС является одним из приоритетных направлений, указанных в Стратегии научно-технологического развития<sup>1</sup> и Энергетической

<sup>1</sup> Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденная Указом Президента Российской Федерации

стратегии Российской Федерации на период до 2035 года<sup>1</sup>.

Суммарная мощность ЛИЭС в России на сегодняшний день составляет около 15–17 ГВт (Илюшин, 2020; Чаусов и др., Сибиров, 2020; Папков и др., 2018), при этом наблюдается динамика их роста (Чаусов и др., 2020). Основной причиной, обуславливающей появление ЛИЭС, является наличие в регионах РФ локальных дефицитов по электрической и тепловой мощности и энергии. Их создание на основе розничной когенерации сопровождается повышением доступности к более дешевым источникам электрической и тепловой энергии.

Обладая определенными конкурентными преимуществами (Илюшин, 2020; Чаусов и др., 2020; Папков и др., 2018), ЛИЭС, как правило, работают без взаимосвязи с региональной СЦЭ, так как их интеграция зачастую сдерживается существующей институциональной средой и недостаточным уровнем интеллектуализации систем децентрализованного управления. Однако эволюция развития энергетики России и других стран указывает на появление системных эффектов от объединения (Волкова и др., 2014): сокращение суммарной величины аварийных резервов при сохранении уровня балансовой надежности, повышение эффективности работы электростанций разных типов в объединенной энергосистеме и др. Гипотезой исследования является предположение, что объединение ЛИЭС и региональных СЦЭ позволит получить значимые системные технологические и экономические эффекты, связанные с повышением надежности, экономичности и экологичности систем энергоснабжения.

Целью статьи является обоснование интеграции ЛИЭС для повышения гибкости региональных систем централизованного электроснабжения и получения новых системных эффектов. Для достижения цели авторами проведено исследование генезиса распределенной энергетики в России, выявлены приоритетные ЛИЭС и системные эффекты, получаемые от их интеграции в региональные СЦЭ, определены барьеры, сдерживающие переход к распределенной энергетике,

Федерации от 01.12.2016 № 642. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41449/> (дата обращения: 15.02.2022).

<sup>1</sup> Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-п. URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения: 15.02.2022).

вынесены на обсуждение предложения по их устранению.

За рубежом аналогом объекта исследования является Microgrid, основу которых, как правило, составляют установки, работающие на ВИЭ. При этом главный предмет зарубежных исследований — решение задачи обеспечения управляемости Microgrid, отличающимися прерывистыми стохастическими режимами генерации (Recaldea & Alvarez-Alvarado, 2020; Hutty et al., 2020; Tungadio et al., 2017; Tungadio & Sun, 2020; Abbey et al., 2014; Bella et al., 2020).

В России основные исследования сосредоточены в области использования распределенной генерации мощностью до 25 МВт (Samoylenko et al., 2021; Kulikov et al., 2021; Папков и др., Осокин & Куликов, 2018). Использование в ЛИЭС управляемых когенерационных источников позволяет обеспечить их сбалансированность и самодостаточность. Следует отметить, что вопросы объединения ЛИЭС с региональными СЦЭ отличаются от процесса разработки схем выдачи мощности электростанций. Объединение энергосистем, сопровождающееся системными эффектами, требует иных технических решений, разработка которых должна стать предметом изменения и дополнения технологических регламентов.

Обоснование системных эффектов и природы их возникновения составляет научную новизну и практическую актуальность данной статьи.

### Источники информации и используемые методы

Теоретический фундамент статьи формируют труды отечественных и зарубежных ученых, посвященных проблемам повышения эффективности систем энергоснабжения (Quint et al., 2019; Voropai, 2021; Makarov et al., 2021; Recaldea & Alvarez-Alvarado, 2020; Hutty et al., 2020; Tungadio et al., 2017; Tungadio & Sun, 2020; Abbey et al., 2014; Smart Electrification with Renewables..., 2022; Папков и др., 2018). В качестве эмпирической базы использованы данные Ассоциации малой энергетики, некоммерческого партнерства «Распределенная энергетика»<sup>2</sup>, результаты аналитики НТИ «Энерджинет» о созданных ЛИЭС, инновационного центра Сколково (Княгин & Холкин, 2017, Чаусов и др., 2020; Папков и др., 2018;

<sup>2</sup> Материалы круглого стола ТП «Малая распределенная энергетика». URL: <http://www.reenfor.org/upload/files/f91e3e2f4c1a8d41af6dd5bc6f632429.pdf> (дата обращения: 04.09.2021).



Распределенная энергетика в России..., 2018), открытая информация АО «Системный оператор Единой энергетической системы»<sup>1</sup>, ПАО «Россети»<sup>2</sup>. Нормативно-правовой базой являются правила и регламенты, определяющие порядок взаимодействия объектов распределенной энергетики с СЦЭ, а также региональные программы повышения энергоэффективности и энергосбережения, экономического и социального развития, характеризующие состояние и перспективы электроэнергетики регионов.

Анализ опыта реализации проектов создания ЛИЭС различного назначения позволил конкретизировать представленную выше авторскую гипотезу: оптимальное повышение надежности, экономичности и экологичности систем энергоснабжения достигается за счет интеграции коммунальных ЛИЭС в региональные СЦЭ, что, в свою очередь, содействует устойчивому социально-экономическому развитию регионов.

Проверка гипотезы включала исследование генезиса возникновения ЛИЭС и определение направлений их развития. Применялись методы системного анализа отдельных свойств СЦЭ и влияния на них интеграции ЛИЭС, позволившие установить соответствие интеллектуализации и интеграции систем электроснабжения целям устойчивого развития регионов и идентифицировать недостатки институциональной среды, сдерживающей процесс интеграции ЛИЭС.

## Результаты

### *Генезис перехода к распределенной энергетике в России*

Переход к распределенной энергетике в России имеет много общего с мировой практикой, но обладает определенными особенностями, обусловленными историей развития отечественной энергетики.

Первыми объектами распределенной энергетике, где в качестве энергоресурса использовалась вторичная продукция основного производства, стали утилизационные энергоустановки на крупных энергоемких предприятиях, в том числе большой мощности. На такие объекты не распространяется порядок, требующий выдачи энергии и мощности на оптовый

рынок. Это позволило потребителям сократить затраты на энергоснабжение, получить инвестиционную поддержку за утилизацию вредных для окружающей среды продуктов технологического процесса и сэкономить от сокращения оплаты за загрязнение окружающей среды.

Драйверами энергетического перехода к распределенной энергетике большой мощности являются предприятия металлургической промышленности. Например, на Новолипецком металлургическом комбинате (НЛМК) электроснабжение осуществляется от утилизационной ТЭЦ. Самообеспеченность НЛМК в электроэнергии по итогам 2019 г. составила 65 %, а после реализации проекта по строительству новой УТЭЦ мощностью 300 МВт она составит 95 %<sup>3</sup>. На Череповецком металлургическом комбинате доля собственной электроэнергии на основе утилизации вторичных энергоресурсов в 2019 г. составила 75,1 %, цель к 2023 г. — 95 % (Мазурова, Гальперова, 2018).

Нефтедобывающие компании используют для собственной генерации попутный нефтяной газ, снижая объем факельного сжигания. Так, ЛУКОЙЛ располагает собственной генерацией общей мощностью 1750 МВт. Ее выработка за 2020 г. составила 7080 млн кВт·ч, что обеспечивает не менее 35 % электропотребления компании.

На остальные источники электрической мощностью более 25 МВт правила оптового рынка и регламенты централизованного оперативно-диспетчерского управления распространяются. Местонахождение и эффективность источников данного типа не сказывается на стоимости электроэнергии в регионах, цена которой определяется на оптовом рынке и ретранслируется с учетом сетевой составляющей на розничный рынок. Это стимулирует появление генерации малой мощности до 25 МВт как субъектов розничного рынка, эффективность которых определяется отсутствием сетевой составляющей и внерыночных надбавок.

Массовое появление объектов распределенной энергетике привело к изменению структуры систем электроснабжения, к появлению ЛИЭС как собственных систем электроснабжения потребителей (Бушуев, 2019; Воропай и др., 2019). Указанным изменением расширяется область допустимых схемно-режимных состояний и таким образом повышается гибкость систем электроснабжения. Основными

<sup>1</sup> Системный оператор Единой энергетической системы. URL: <https://www.so-ops.ru> (дата обращения: 04.05.2022).

<sup>2</sup> Россети. URL: <https://www.rosseti.ru> (дата обращения: 01.04.2022).

<sup>3</sup> Собственная генерация. Energypolis. URL: <https://energy-polis.ru/news/2676-sobstvennaya-generaciya-na-predpriyatii.html> (дата обращения: 16.04.2022).

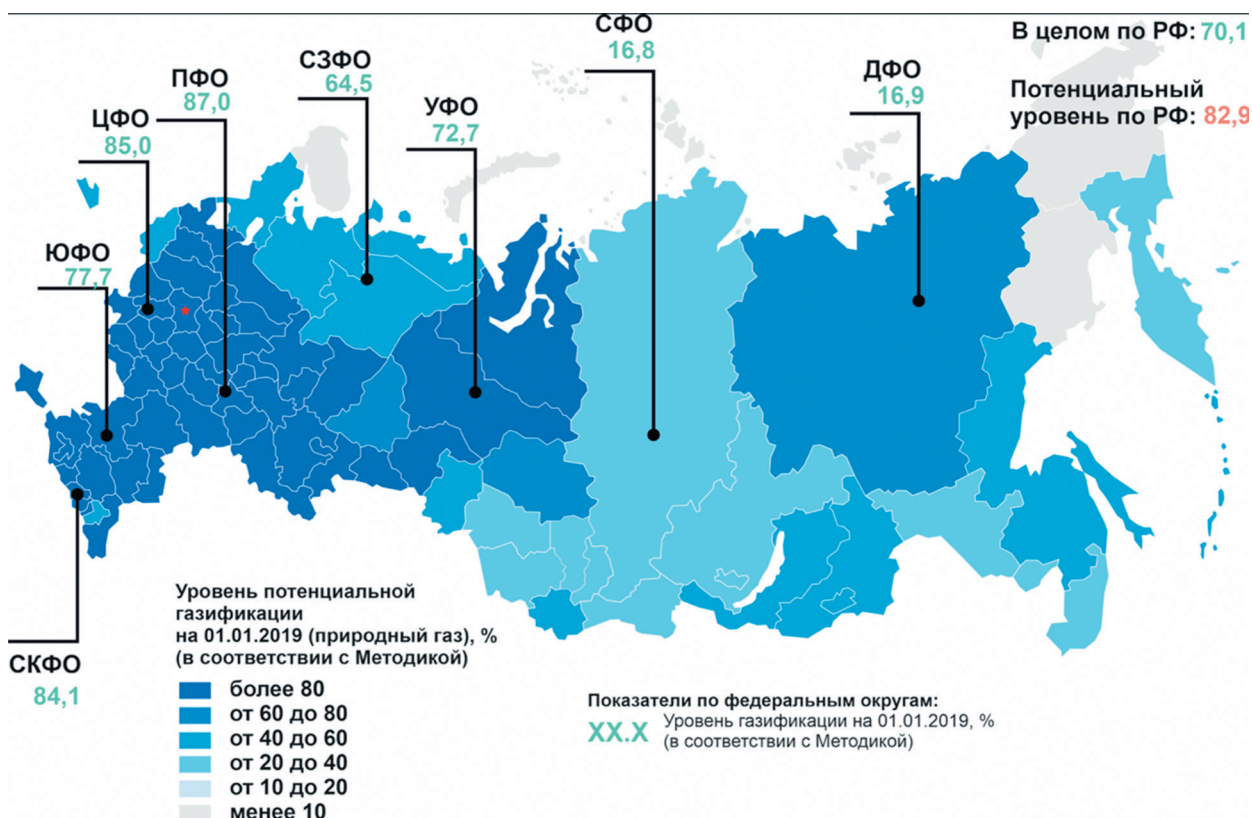


Рис. 2. Уровень газификации в России на 1 января 2020 г.  
Fig. 2. Gas penetration rate in Russia as of January 1, 2020

причинами указанных преобразований стало стремление к энергетической безопасности, независимости и сохранению окружающей среды. Процесс перехода к распределенной энергетике сопровождается интеллектуализацией управления, что предполагает, с одной стороны, функциональную самостоятельность каждой ЛИЭС, с другой — их эффективное взаимодействие между собой.

В российских природно-климатических условиях основой ЛИЭС становится когенерация электрической и тепловой энергии, триггером развития которой послужила тотальная газификация страны, радикально изменившая топливный ландшафт в регионах (рис. 2) (Тараборин, 2020). По итогам 2021 г. уровень газификации субъектов РФ уже составил 71 %, а к 2035 г. целевой показатель — 82,9 %<sup>1</sup>.

Потребность в тепловой энергии привела к созданию мини-ТЭЦ в регионах с резко-континентальным климатом, где совмещенное производство тепловой и электрической энергии эффективнее раздельного, основан-

ного на котельных и электрических станциях. Эффективность мини-ТЭЦ обусловлена непосредственной близостью к потребителям энергии, что сопровождается повышением надежности энергоснабжения, снижением расходов энергоносителей и, соответственно, сокращением вредных выбросов в окружающую среду.

Указанные эффекты достигаются благодаря высокому КПД когенерационных установок, превышающему 85 %. Конкурентоспособность производимой тепловой и электрической энергии проявляется отпуском более экономически доступной энергии. Инвестиционная привлекательность мини-ТЭЦ определяется сложившимся на розничных рынках уровнем цен на энергию, обусловленных действующими механизмами цено- и тарифообразования на тепловую и электрическую энергию. При существующем порядке срок окупаемости мини-ТЭЦ составляет около 3 лет. При поставках электроэнергии населению и приравненным к нему группам потребителей по соответствующим социально ориентированным тарифам срок окупаемости возрастает до 5 лет в зависимости от региона (Filipov, 2018).

Благодаря низким срокам окупаемости и заинтересованностью в снижении затрат на энергоснабжение со стороны промышленных, сельскохозяйственных и коммерческих

<sup>1</sup> Новак заявил, что уровень газификации России по итогам 2021 года составил 71 %. ТАСС. URL: <https://tass.ru/ekonomika/13404071> (дата обращения: 16.09.2021); Новая модель газификации субъектов Российской Федерации. Министерство энергетики РФ. URL: <https://minenergo.gov.ru> (дата обращения: 14.05.2022).

Таблица 1  
Ведущие компании на рынке распределенной  
энергетики в России

Table 1  
Leading companies in the distributed energy market in  
Russia

Компания	Количество проектов компании	Суммарная мощность, МВт
ROLT Group	90	790
ГРИНТЕХ ЭНЕРДЖИ	20	450
Группа компаний «МКС»	54	266

потребителей на отечественном рынке появились и действуют компании, предлагающие комплексные услуги по проектированию и строительству мини-ТЭЦ (табл. 1).

Указанные факторы привели к росту числа и мощности объектов распределенной энергетики. Появились системы комбинированного энергоснабжения предприятий (СКЭС), где часть электроэнергии производится собственными источниками, работающими параллельно с СЦЭ (Чаусов и др., 2020; Kulikov et al., 2021). По оценкам экспертов, темпы ввода СКЭС составляют более 1000 МВт в год<sup>1</sup>.

Анализ практики функционирования СКЭС показывает, что генерация в данных системах работает в режиме «следование за нагрузкой», а присоединение к региональной СЦЭ основано на принципе исключения выдачи мощности и энергии в региональные сети, что определяется требованиями территориальных сетевых организаций и Системным оператором ЕЭС России.

Однако массовое создание СКЭС промышленными, сельскохозяйственными и коммерческими потребителями сопровождается негативными системными эффектами:

— снижение темпов роста электропотребления в ЕЭС России, что порождает повышение избыточности генерирующих и сетевых мощностей и ведет к росту цен на электрическую мощность и энергию, тарифов на услуги по передаче электроэнергии. В итоге снижается доступность электроэнергии для оставшихся на розничном рынке потребителей;

— сокращение доли промышленной нагрузки в структуре электропотребления, что снижает плотность графика нагрузки в ЕЭС России и ведет к росту требований к вводу высокоманевренных мощностей.

Наличие негативных эффектов не стало сдерживающим фактором развития СКЭС, так как для самих предприятий очевидны экономические эффекты от перехода к распределенной энергетике. Несмотря на запрет выдачи мощности и энергии во внешнюю сеть, который снижает размер получаемых экономических эффектов, указанный процесс набирает высокие темпы и сопровождается интеллектуализацией систем электроснабжения промышленных, сельскохозяйственных и коммерческих потребителей. Известна попытка создания активных энергетических комплексов (АЭК), оснащаемых управляемыми интеллектуальными соединениями, предназначенными обеспечить взаимосвязь с СЦЭ, где нормативно предусматривается исключение выдачи мощности в СЦЭ (Бушуев, 2019; Чаусов и др., 2020).

Резюмируя результаты данного раздела, можно указать, что развитие распределенной энергетики в РФ характеризуется положительной динамикой и в основном связано с когенерационными технологиями, что отличает Россию от других стран, в которых распределенная энергетика ориентирована на использование возобновляемых источников энергии.

#### *Анализ опыта создания и интеграции ЛИЭС различного назначения*

Существующий опыт по созданию локальных систем энергоснабжения, накопленный в различных отраслях и сферах деятельности, показывает, что наиболее распространенной является островная, автономная работа указанных систем. Основными недостатками «островов» являются необходимость резервов и работа когенерационных установок, определяемая необходимостью покрытия переменного суточного графика электрической нагрузки, что требует наличия котельного оборудования, так как суточный график тепловой нагрузки имеет постоянный характер. Этот режим когенерации сопровождается снижением коэффициента использования установленной мощности (КИУМ), коэффициента полезного использования топлива (КПИТ) и, следовательно, экономических показателей, что ведет к увеличению сроков окупаемости проектов. Важный недостаток работы в островном режиме — отсутствие гибкости ЛИЭС, так как отсутствует возможность двустороннего электроснабжения потребителей.

В качестве примера можно указать на различные островные ЛИЭС, действующие в зоне СЦЭ, но не имеющие с ними электрической связи. Одной из таких систем являются ряд

<sup>1</sup> Смергина П., Дятел Т. Бизнес просит энергичных мер. Коммерсант. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5252506> (дата обращения: 14.03.2022).

## Примеры ЛИЭС различного назначения

Table 2

## Examples of SLES for various purposes

Объект	Мощность мини-ТЭЦ, МВт	Используемое оборудование
<i>Промышленные ЛИЭС</i>		
Энергоцентр «НЛМК-Урал»	4,5	MWM
Энергоцентр-1 АО «ЮГК»	18	MWM
Энергоцентр-2 АО «ЮГК»	24,4	Caterpillar, MWM
Энергоцентр СУМЗ	21,5	MWM
Энергоцентр ПАО Лукойл	18	ПАО «ОДК-Сатурн»
Энергоцентр ПАО Лукойл	30	ОАО «Авиадвигатель»
<i>Сельскохозяйственные ЛИЭС</i>		
Тепличный комплекс «Рязанские овощи»	18	GE JENBACHER
Тепличный комплекс «Юг-Агро»	16,4	GE JENBACHER
Тепличный комплекс «Зеленая Линия»	17,2	GE JENBACHER
ООО «Новые технологии»	11,8	GE JENBACHER
<i>Коммерческие ЛИЭС</i>		
Складской комплекс MLP	7,2	Siemens
Челябинский распределительный центр ПАО «Магнит»	2,4	MWM
Тамбовский распределительный центр ПАО «Магнит»	0,8	MWM
Лермонтовский распределительный центр ПАО «Магнит»	2,5	MWM
<i>Коммунальные ЛИЭС</i>		
ЛИЭС на базе мини-ТЭЦ «Центральная»	33	KAWASAKI
ЛИЭС на базе энергоцентра «Мякино»	30	GE JENBACHER
ЛИЭС на базе мини-ТЭЦ в г. Звенигород	18	ОАО «Авиадвигатель»
ЛИЭС на базе мини-ТЭЦ в ЖК Измайлово	3	FG Wilson
ЛИЭС на базе энергоцентра Ольгино	21,6	Solar Turbines
ЛИЭС на базе энергоцентра Лобня-1	36	GE JENBACHER

ЛИЭС ПАО «Магнит», расположенных в различных регионах России. Другим примером островных ЛИЭС является система энергоснабжения комплексов административных правительственных зданий (ЛИЭС на базе энергоцентра «Мякино»). В таблице 2 показаны систематизированные авторами различные по назначению и мощности ЛИЭС, сформированные на базе мини-ТЭЦ и распределительных сетей 0,4–10 кВ. Указанные примеры получены на основе анализа реализованных проектов<sup>1</sup> и на основе данных в (Чаусов и др., 2020; Распределенная энергетика в России..., 2018; Мазурова & Гальперова, 2018).

Приведенные в таблице 2 отдельные кейсы работающих в островном режиме ЛИЭС позволяют показать наличие различных по на-

<sup>1</sup> Собственная генерация. URL: <https://energy-polis.ru/news/2676-sobstvennaya-generaciya-na-predpriyatii.html> (дата обращения: 16.04.2022); Реализованные проекты ООО «ГринТехЭнерджи». URL: <https://greentechenergy.ru/proektu/> (дата обращения: 10.03.2022); Реализованные проекты ООО «Восточная техника». URL: [https://www.vosttech.ru/silovye\\_ustanovki/vypolnennye\\_proekty/](https://www.vosttech.ru/silovye_ustanovki/vypolnennye_proekty/) (дата обращения: 10.03.2022).

значению ЛИЭС. До последнего времени основой большинства ЛИЭС были импортные газопоршневые и газотурбинные установки. Причинами этого являются более высокие значения КПД и эксплуатационного ресурса. В современных условиях следует ожидать применения оборудования, выпускаемого российскими производителями, так как тенденция увеличения числа и мощности ЛИЭС будет сохраняться при существующем уровне цен на розничном рынке.

Интеграция данных систем в состав региональных СЦЭ может повысить их эффективность. Для этого необходима обоюдная заинтересованность в формировании взаимовыгодных отношений, участие органов исполнительной власти в создании благоприятной институциональной среды. Последнее предполагает разработку региональных проектов энергетического перехода к распределенной энергетике в программах социально-экономического развития регионов.

Можно утверждать, что в городах, где система централизованного теплоснабжения основана на средних и крупных котельных, сло-



жились необходимые условия для появления мини-ТЭЦ как основы создания и интеграции ЛИЭС. Интеграция ЛИЭС в региональную СЦЭ расширяет область допустимых схемно-режимных состояний в нормальных и послеаварийных режимах, так как возможна их работа в составе региональной энергосистемы или в острове. В этом и состоит повышение гибкости систем энергоснабжения, что требует интеллектуализации их систем управления.

### **Экономические эффекты от развития коммунальных ЛИЭС**

Наличие и размер системных экономических эффектов во многом определяются назначением ЛИЭС. Промышленные, сельскохозяйственные, коммерческие ЛИЭС в качестве основной цели имеют снижение затрат хозяйствующих субъектов на энергоснабжение. Однако отдельно следует выделить коммунальные ЛИЭС, основным потребителем которых является население и приравненные к нему группы потребителей социально защищенной категории. Для указанной категории устанавливаются пониженные тарифы на электрическую энергию, что сопровождается повышением стоимости электроэнергии для прочих потребителей и приводит к перекрестному субсидированию. Очевидно, что создание коммунальных ЛИЭС снижает остроту проблемы перекрестного субсидирования и положительно сказывается на стоимости электрической энергии на розничном рынке.

Примером первой коммунальной ЛИЭС является созданная система энергоснабжения микрорайона «Березовый» в г. Новосибирск. В таблице 3 приведены характеристики основного генерирующего оборудования ЛИЭС. Характерной особенностью данного объ-

екта является наличие котельного оборудования, мощность которого значительно выше электрической мощности когенерационных установок. На территории ЛИЭС потребность в тепловой мощности в 3 раза превышает потребность в электрической. Следует отметить, что по отдельным округам России указанное соотношение варьируется от 1,5 до 5 раз, поэтому суммарная мощность источников тепла в 4 раза превышает мощность электростанций.

До 2021 г. система работала в островном режиме. Интеграция данной ЛИЭС в региональную СЦЭ не имеет аналогов и является прорывным проектом на уровне страны в целом. Важно отметить доступность электроэнергии для потребителей. В ЛИЭС «Березовая» уровень цен на электрическую энергию на 10 % ниже предельного уровня нерегулируемых цен на электрическую энергию (мощность) энергосбытовых компаний, действующих в Новосибирской области.

Эффектами интеграции стало повышение доступности и надежности электроснабжения, качества электроэнергии в энергорайоне ПС «Силикатная».

Сокращение затрат на эксплуатацию и ремонт оборудования, экономия газа, повышение доходов от роста отпуска энергии в СЦЭ, повышение бесперебойности электроснабжения и качества электрической энергии, сокращение вредных выбросов в атмосферу — дополнительные экономические эффекты, полученные в результате интеграции ЛИЭС. Размер указанных эффектов во многом зависит от технических характеристик генерирующего и сетевого оборудования, уровня интеллектуализации и быстродействия системы управления нормальными и послеаварийными режимами,

Таблица 3

### **Характеристика мини-ТЭЦ в ЛИЭС «Березовая»**

Table 3

#### **Characteristics of the mini-thermal power plant in the SLES Berezovaya**

Оборудование	Мощность агрегата, МВт	Количество, шт.	Мощность на мини-ТЭЦ, МВт
<i>Электрическое оборудование</i>			
G3520 E Caterpillar	2 (электрическая мощность)	5	10,0
	2,15 (тепловая мощность)		10,75
Дизель-генераторная установка 1600-10 Caterpillar	1,6	2	3,2
<i>Котельное оборудование</i>			
Котлоагрегат Buderus	11,2	2	22,4
Котлоагрегат Термотехник-ТТ 100	2,5	2	5,0
Котлоагрегат Buderus	19,2	2	38,4

соответствия структуры генерации структуре потребления в ЛИЭС, выполнения ею дополнительных системных функций, к примеру, агрегатора управления спросом на энергию (Byk & Myshkina, 2019; Бык и др., 2021).

Анализ отчетных данных до и после интеграции коммунальной ЛИЭС «Березовая» в состав региональной СЦЭ позволяет оценить размер получаемых эффектов:

- увеличена на 20 % выработка электроэнергии, что позволило повысить КИУМ и КПИТ когенерационной установки, сократило отпуск тепла с котельного оборудования;

- получены дополнительные доходы от энергосбытовой компании, закупающей по цене оптового рынка избытки электроэнергии для поставки на розничный, что позволило окупить за 6 месяцев затраты на интеллектуализацию системы управления;

- исчезла необходимость в резервных дизельных агрегатах, которые теперь используются ООО «Генерация Сибири» для повышения надежности электроснабжения других котельных, что позволило сократить инвестиции на развитие бизнеса;

- снизились затраты на приобретение 15 % объема природного газа и появилась возможность использования сэкономленного газа для расширения зоны теплоснабжения;

- оказываются системные услуги региональной ТСО в части мультиагентного управления узловыми напряжениями и предоставляется регулировочный ресурс в размере 1500 кВт агрегатору управления спросом на электрическую энергию в ЕЭС России.

Коммунальные ЛИЭС, в отличие от промышленных, сельскохозяйственных и коммерческих, обеспечивают энергоснабжение не конкретных объектов, а отдельных территорий в регионах. В создании и интеграции коммунальных ЛИЭС во многом заинтересованы органы исполнительной власти региона, так как на территориях в зоне действия данных ЛИЭС создаются благоприятные условия электроснабжения предприятий малого и среднего бизнеса, что соответствует целям устойчивого развития.

Появление интегрированных коммунальных ЛИЭС сопровождается положительными системными эффектами, которые выражаются не только в снижении нагрузки перекрестного субсидирования на предприятия, но и в повышении долговечности оборудования, снижении затрат на снятие сетевых ограничений, участии в управлении спросом, повышении КИУМ и КПИТ крупных электростанций и пр.

Кроме этого, возрастает энергонезависимость и повышается конкуренция среди субъектов розничного рынка, что позволяет органам исполнительной власти субъектов РФ предоставлять определенные преимущества важным для жизнедеятельности регионов субъектам экономики.

Естественно, становится необходимой количественная оценка получаемых системных эффектов, размер которых в каждом регионе будет различным, однако состав эффектов будет идентичен. Формирование организационно-экономических взаимоотношений между субъектами регионального розничного рынка электроэнергии требует изменений институциональной среды на уровне субъектов РФ, прежде всего в части разработки механизмов монетизации указанных эффектов и их распределения между субъектами.

### *Дискуссия: барьеры и препятствия развития ЛИЭС*

Интеграция ЛИЭС в энергорайон сопровождается расширением области допустимых схемно-режимных состояний системы электроснабжения. Для обеспечения перехода из одного состояния в другое без прерывания электроснабжения потребителей предназначена децентрализованная интеллектуальная система управления, предполагающая наличие соответствующего уровня цифровизации для обеспечения наблюдаемости и управляемости производством, передачей и потреблением электроэнергии в энергорайоне. Логика работы автоматики должна основываться на искусственном интеллекте, способном выбирать наиболее эффективные управляющие воздействия для сохранения бесперебойного электроснабжения при внешних и внутренних возмущениях. Наличие режимной автоматики для управления генерирующим и сетевым оборудованием обеспечивает получение новых системных экономических эффектов (Фишов, Ивкин, Головкин, 2021).

Интеграция ЛИЭС в региональную СЦЭ обеспечивает независимое двустороннее питание потребителей от районных подстанций и когенерационных установок ЛИЭС, что, очевидно, повышает надежность систем электроснабжения. Использование интеллектуальных приборов учета и контроля обеспечит поддержание индекса технического состояния силового оборудования на требуемом уровне, что повышает эффективность системы управления производственными активами и снижает эксплуатационные издержки.

Практическое применение разработанной автоматики для ЛИЭС «Березовое» показало возможность сочетания функций режимной и противоаварийной автоматики (Фишов и др., 2021; Ghulomzoda et al., 2020; Fishov et al., 2019), что позволило добиться снижения расходов природного газа на производство тепловой и электрической энергии, а выполнение функции противоаварийной автоматики повысило бесперебойность электроснабжения.

Несмотря на практическую реализацию разработанной интеллектуальной системы управления и ее успешную опытно-промышленную эксплуатацию, переход к распределенной энергетике и формированию ячеистых структур энергосистем на основе ЛИЭС сталкивается с различного рода препятствиями. К основным сдерживающим факторам следует отнести прежде всего действующие технологические регламенты, нормативно-правовые акты, определяющие организационно-экономические отношения и механизмы ценообразования.

Результаты анализа авторов показали, что существующая институциональная среда сформирована, прежде всего, в интересах крупных генерирующих компаний, сетевых организаций и других основных субъектов электроэнергетики. Государство как основной собственник заинтересованно в экономической стабильности крупных участников рыночных отношений, формирующих ядро электроэнергетики (Бык и др., 2021; Бык & Епифанцев, 2021). Однако несмотря на существующие барьеры, борьба за клиентоориентированность, повышение конкуренции стимулируют переход к распределенной энергетике, формирующей экономическую и техническую доступность электроснабжения. Наблюдается процесс трансформации пассивных потребителей в активных участников розничного рынка в регионах, но массовое появление промышленных СКЭС сопровождается ростом нагрузки перекрестного субсидирования<sup>1</sup> для оставшихся в СЦЭ предприятий (Долматов & Золотова, 2018). Очевидное стремление сохранить промышленный базис как основу региональной экономики при сохранении действующих порядка и правил рано или поздно вынудит региональные власти повышать тарифы для населения, что при существующих темпах роста доходов вызовет социальную напряженность в регионах.

<sup>1</sup> Перекрестное субсидирование в электроэнергетике России. Международный бенчмаркинг. Аналитическое исследование. КРМГ. URL: <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/ru/pdf/2020/07/ru-ru-cross-subsidies-in-the-russian-power-industry.pdf> (дата обращения: 25.10.2021).

Существует другое решение, требующее снятия ограничений на выдачу мощности из СКЭС в энергорайон, что позволит уменьшить их отрицательное влияние на доступность электроснабжения. Для снижения негативных последствий целесообразно стимулировать СКЭС осуществлять выдачу мощности в часы максимальных нагрузок и снижение загрузки генераторов в часы минимальных нагрузок. Работа СКЭС в режиме просьюмера позволит уплотнить график работы крупных электростанций и силовых трансформаторов районных подстанций. Это положительно скажется на их долговечности, сократив затраты на техническое обслуживание и ремонт. Аналогичную задачу по выравниванию графика нагрузки на уровне ЕЭС решает агрегатор управления спросом как новый субъект оптового рынка. Аналогичный субъект розничного рынка может быть создан в каждом регионе.

Полезным и значимым может стать изменение правил розничного рынка, где целесообразно снять для гарантирующего поставщика ограничение на цену закупки электроэнергии у розничных генераторов. Установление закупочной цены в размере действующего тарифа для населения приведет к превращению дефицитных СКЭС в избыточные ЛИЭС. Этот эффект положительно скажется на повышении доступности к недорогой электроэнергии и надежности систем энергоснабжения.

Задачи совершенствования законодательства и устранения административных барьеров во многом решаются НТИ «Энерджинет». Деятельность НТИ «Энерджинет» направлена на повышение эффективности систем энергоснабжения, например путем создания активных энергетических комплексов (коллективных СКЭС), использования систем накопления энергии, технологий управления спросом и в результате — создание условий для повышения интеллектуализации энергетики<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам функционирования активных энергетических комплексов. Постановление Правительства РФ от 21.03.2020 № 320 URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202003240012> (дата обращения: 12.05.2022); О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам функционирования агрегаторов управления спросом на электрическую энергию в Единой энергетической системе России, а также совершенствования механизма ценозависимого снижения потребления электрической энергии и признания утратившими силу отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации. Постановление Правительства РФ от 08.02.2021 № 132. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102090023>

Согласованность и последовательность действий органов исполнительной власти регионального и федерального уровней, направленных на формирование благоприятной институциональной среды для интеграции коммунальных ЛИЭС, позволит снизить остроту и в итоге решить серьезную проблему электроэнергетики — наличие перекрестного субсидирования и не рыночных надбавок на ОРЭМ. Это станет одной из действенных форм развития региональной экономики, повышения ее инвестиционной привлекательности, создания новых рабочих мест и поддержки отечественных производителей газопоршневых и газотурбинных установок.

### Заключение

Интеграция локальных интеллектуальных энергосистем в региональную систему централизованного электроснабжения позволяет трансформировать существующую «каскадную» структуру с последовательным односторонним потоком электрической энергии с оптового рынка на региональные розничные рынки, от крупных генерирующих компаний к распределенным по территории страны потребителям, в «ячеистую». ЛИЭС будет выступать в качестве «ячейки» на розничном рынке и региональной системы электроснабжения. Технология управления функционированием ячеистой системы существенно изменится и потребует интеллектуализации. Наличие взаимосвязей с соседними ячейками ведет к повышению экономичности, надежности и экологичности региональной энергосистемы. Это проявляется повышением характеризующих эффективность региональной СЦЭ основных показателей: доступность электрической энергии, открытость систем энергоснабжения, бесперебойность электроснабжения, объем выбросов парниковых газов.

(дата обращения: 03.03.2022); План мероприятий («Дорожная карта») НТИ «Энерджинет», утвержденный распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 марта 2022 г. № 402-р. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403524366/> (дата обращения: 24.05.2022).

### Список источников

- Бушуев, В. В. (2019). Электроэнергетика будущего как фактор активного развития цивилизации. *Окружающая среда и энергоснабжение*, 3, 22–29.
- Бык, Ф. Л., Епифанцев, А. В. (2021). Активный энергетический комплекс: правовой эксперимент или «разведка боем»? *Бизнес. Образование. Право. Вестник Волгоградского института бизнеса*, 2(55), 234–238. DOI: 10.25683/VOLBI.2021.55.247.
- Бык, Ф. Л., Епифанцев, А. В., Мышкина, Л. С. (2021). Коммунальная энергетика, или «Размер имеет значение». *Бизнес. Образование. Право*, 4(57), 260–265.
- Волкова, Е. Д., Подковальников, С. В., Чудинова, Л. Ю. (2014). Системные эффекты интеграции электроэнергетических комплексов стран постсоветского пространства. *Проблемы прогнозирования*, 2, 33–43.

Полученные результаты подтверждают верность выдвинутой гипотезы: интеграция коммунальных ЛИЭС в региональную СЦЭ сопровождается появлением новых системных эффектов, содействующих устойчивому социально-экономическому развитию региона. Показано их преимущество относительно других по назначению ЛИЭС. Конкурентная и стабильная цена на электрическую энергию, снижение нагрузки перекрестного субсидирования в регионе обеспечивают повышение доступности электрической энергии. Снижение стоимости тепловой энергии для потребителей в локальной энергосистеме обусловлено применением когенерационных технологий.

Создание и интеграция коммунальных ЛИЭС сопровождаются повышением плотности графика нагрузки, что ведет к росту энергоэффективности производства энергии на крупных электростанциях и ослаблению требований к маневренности генерирующего оборудования. Последнее позволяет снизить объем программы ДПМ и соответствующую рыночную надбавку к стоимости электроэнергии. Появление двустороннего питания от когенерационных установок и от подстанции централизованной сети повышает бесперебойность электроснабжения потребителей, входящих в коммунальную ЛИЭС.

Однако внедрение ЛИЭС в регионах сталкивается с рядом ограничений. В этой связи авторами обоснована целесообразность изменения институциональной среды для энергетического перехода к распределенной энергетике. Изменения в системах организационно-технологических, организационно-экономических и организационно-правовых отношений снизят инвестиционные риски и повысят инвестиционную привлекательность региональной энергетике для частных инвесторов.

Предметом дальнейших исследований является разработка моделей и механизмов монетизации системных эффектов от внедрения ЛИЭС, что позволит оценить их размер с учетом региональных особенностей.



- Воропай, Н. И., Стенников, В. А., Барахтенко, Е. А. (2019). Интегрированные энергетические системы: вызовы, тенденции, идеология. *Проблемы прогнозирования*, 5, 39-49.
- Дзюба, А. П., Соловьева, И. А. (2021). Перспективы управления спросом на энергоресурсы в регионах России. *Экономика региона*, 2(17), 502-519. DOI: 10.17059/ekon.reg.2021-2-11.
- Долматов, И. А., Золотова, И. Ю. (2018). Перекрестное субсидирование в электроэнергетике. Каков предел роста? *Стратегические решения и риск-менеджмент*, 2, 16-20.
- Илюшин, П. В. (2020). Перспективы применения и проблемные вопросы интеграции распределенных источников энергии в электрические сети. *Библиотечка электротехника*, 8(260), 1-116.
- Княгин, В. Н., Холкин, Д. В. (Ред.). (2017). *Цифровой переход в электроэнергетике России: экспертно-аналитический доклад*. Москва, Центр стратегических разработок, 47.
- Куклин, А. А., Мызин, А. Л., Пыхов, П. А., Потанин, М. М. (2013). Диагностика и механизмы повышения энергетической безопасности России. *Вестник Забайкальского государственного университета*, 10, 134-149.
- Мазурова, О. В., Гальперова, Е. В. (2018). Долгосрочные тенденции энергопотребления в основных секторах экономики. *Энергия: экономика, техника, экология*, 11, 22-28.
- Папков, Б. В., Осокин, В. Л., Куликов, А. Л. (2018). Об особенностях малой и распределенной генерации в интеллектуальной электроэнергетике. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*, 4(82), 119-131.
- Тараборин, Р. С. (2020). Государственная политика России в сфере газоснабжения: характеристика и перспективы. *Экономика и социум*, 72, 188-194.
- Фишов, А. Г. Ивкин, Е. С., Головкин, О. В. (2021). Режимы и автоматика минирид, работающих в составе распределительных электрических сетей ЕЭС. *Релейная защита и автоматизация*, 3, 22-37.
- Хохлов, А. А., Мельников, Ю. В., Веселов, Ф. В., Холкин, Д. В., Дацко, К. А. (2018). *Распределенная энергетика в России: потенциал развития*. Москва, Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО, 87.
- Чаусов, Д., Бокарев, Б., Сибиров, В. (2020). *Активные энергетические комплексы — первый шаг к промышленным микрогридам в России. Экспертно-аналитический доклад*. Москва, Инфраструктурный центр ЭнерджиНет, 56. URL: [https://drive.google.com/file/d/1PwyNYskwbaES\\_5oE3utFDDOnbucosZ0q/view](https://drive.google.com/file/d/1PwyNYskwbaES_5oE3utFDDOnbucosZ0q/view) (дата обращения: 14.12.2021).
- Abbey, C., Cornforth, D., Hatzigiorgiou, N., Hirose, K., Kwasinski, A., Kyriakides, E., ... Suryanarayanan, S. (2014). Powering Through the Storm: Microgrids Operation for More Efficient Disaster Recovery. *IEEE Power & Energy Magazine*, 12(3), 67-76.
- Bella, A., Farina, M., Sandroni, C. & Scattolini, R. (2020). Design of Aggregators for the Day-Ahead Management of Microgrids Providing Active and Reactive Power Services. *IEEE Transactions on control systems technology*, 28(6), 2616-2624.
- Бык, Ф. & Мышкина, Л. (2019). The element of digital transformation of regional network — an aggregator. *E3S Web of Conferences*, 139, 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/201913901013.
- Filippov, S. (2018). New technological revolution and energy requirements. *Foresight and STI Governance*, 12(4), 20-33.
- Fishov, A. G., Lizalek, N. N. & Kakosha, Yu. V. (2019). Microgrid with Alternate Current Infrastructure. *54th International Universities Power Engineering Conference*, 8893496.
- Ghulomzoda, A., Gulakhmadov, A., Fishov, A., Safaraliev, M., Chen, X., Rasulzoda, K., ... Ahyoev, J. (2020). Recloser-based decentralized control of the grid with distributed generation in the Lahsh district of the Rasht grid in Tajikistan, central Asia. *Energies*, 13(14), 3673.
- Hutty, T. D., Dong, S. & Brown, S. (2020). Suitability of energy storage with reversible solid oxide cells for microgrid applications. *Energy Conversion and Management*, 226, 113499. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113499.
- IRENA. (2018). *Power System Flexibility for the Energy Transition, Part 1: Overview for policy makers*. International Renewable Energy Agency. Retrieved from: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA\\_Power\\_system\\_flexibility\\_1\\_2018.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA_Power_system_flexibility_1_2018.pdf) (Date of access: 10.04.2022).
- IRENA. (2022). *Smart Electrification with Renewables: Driving the transformation of energy services*. International Renewable Energy Agency. Retrieved from: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Feb/IRENA\\_Smart-Electrification\\_Renewables\\_2022.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Feb/IRENA_Smart-Electrification_Renewables_2022.pdf) (Date of access: 02.05.2022).
- Kulikov, A. L., Ilyushin, P. V. & Loskutov, A. A. (2021). High-Performance Sequential Analysis in Grid Automated Systems of Distributed-Generation Areas. *Russian Electrical Engineering*, 92(2), 90-96.
- Makarov, A. A., Mitrova, T. A. & Kulagin, V. A. (2021). Long-term development of the global energy sector under the influence of energy policies and technological progress. *Russian Journal of Economics*, 6(4), 347-357.
- Quint, R., Dangelmaier, L., Green, I., Edelson, D., Ganugula, V., Kaneshiro, R., ... Stringer, N. (2019). Transformation of the Grid: The Impact of Distributed Energy Resources on Bulk Power Systems. *IEEE Power and Energy Magazine*, 17, 35-45.
- Recaldea, A. A. & Alvarez-Alvarado, M. S. (2020). Design optimization for reliability improvement in microgrids with wind — tidal — photovoltaic generation. *Electric Power Systems Research*, 188, 106540. DOI: 10.1016/j.epr.2020.106540.
- Samoylenko, V., Firsov, A., Pazderin, A. & Ilyushin, P. (2021). Distribution grid future planning under uncertainty conditions. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 19, 499-504.

Tungadio, D. H. & Sun, Y. (2020). Predictive controller for interconnected microgrids. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14, 4273–4283.

Tungadio, D. H., Bansal, R. C. & Siti, M. W. (2017). Optimal control of active power of two microgrids interconnected with two AC tie-lines. *Electric Power Components and Systems*, 45(19), 2188–2199.

Voropai, N. (2021). Electric power system transformations: A review of main prospects and challenges. *Energies*, 13(221), 5639.

## References

Abbey, C., Cornforth, D., Hatziaargyriou, N., Hirose, K., Kwasinski, A., Kyriakides, E., ... Suryanarayanan, S. (2014). Powering Through the Storm: Microgrids Operation for More Efficient Disaster Recovery. *IEEE Power & Energy Magazine*, 12(3), 67–76.

Bella, A., Farina, M., Sandroni, C. & Scattolini, R. (2020). Design of Aggregators for the Day-Ahead Management of Microgrids Providing Active and Reactive Power Services. *IEEE Transactions on control systems technology*, 28(6), 2616–2624.

Bushuev, V. V. (2019). The power industry of the future as a factor in the active development of civilization. *Okruzhayushchaya sreda i energovedenie [Journal of Environmental Earth and Energy Study]*, 3, 22–29. (In Russ.)

Byk, F. & Myshkina, L. (2019). The element of digital transformation of regional network — an aggregator. *E3S Web of Conferences*, 139, 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/201913901013.

Byk, F. L. & Epifantsev, A. V. (2021). The active energy complex: a legal experiment or «combat reconnaissance»? *Biznes. Obrazovanie. Pravo. Vestnik Volgogradskogo instituta biznesa [Business. Education. Law]*, 2(55), 234–238. DOI: 10.25683/VOLBI.2021.55.247. (In Russ.)

Byk, F. L., Epifantsev, A. V. & Myshkina, L. S. (2021). Communal energy or «The size matters». *Biznes. Obrazovanie. Pravo. Vestnik Volgogradskogo instituta biznesa [Business. Education. Law]*, 4(57), 260–265 (In Russ.)

Chausov, D., Bokarev, B. & Sibirov, V. (2020). *Aktivnye energeticheskie komplekсы — pervyy shag k promyshlennym mikrogridam v Rossii. Ekspertno-analiticheskiy doklad [Active energy complexes are the first step towards industrial microgrids in Russia. Expert-analytical report]*. Moscow: EnergyNet Infrastructure Centre, 56. Retrieved from: [https://drive.google.com/file/d/1PwyNYskwbaES\\_5oE3utFDDOnbucosZ0q/view](https://drive.google.com/file/d/1PwyNYskwbaES_5oE3utFDDOnbucosZ0q/view) (Date of access: 14.12.2021). (In Russ.)

Dolmatov, I. A. & Zolotova, I. Yu. (2018). The cross subsidization in the electric power industry. What is the limit of growth? *Strategicheskie resheniya i risk-menedzhment [Strategic decisions and risk management]*, 2, 16–20. (In Russ.)

Dzyuba, A. P. & Solovyeva, I. A. (2021). Prospects for Energy Demand Management in Russian Regions. *Ekonomika regiona [Economy of region]*, 17(2), 502–519. DOI: 10.17059/ekon.reg.2021-2-11 (In Russ.)

Filippov, S. (2018). New technological revolution and energy requirements. *Foresight and STI Governance*, 12(4), 20–33.

Fishov, A. G., Ivkin, E. S. & Golovkin, O. V. (2021). Modes and automation of minigrids operating as part of the distribution electric networks of the UES. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya [Relay protection and automation]*, 3, 22–37. (In Russ.)

Fishov, A. G., Lizalek, N. N. & Kakosha, Yu. V. (2019). Microgrid with Alternate Current Infrastructure. *54th International Universities Power Engineering Conference*, 8893496.

Ghulomzoda, A., Gulakhmadov, A., Fishov, A., Safaraliev, M., Chen, X., Rasulzoda, K., ... Ahyoev, J. (2020). Recloser-based decentralized control of the grid with distributed generation in the Lahsh district of the Rasht grid in Tajikistan, central Asia. *Energies*, 13(14), 3673.

Hutty, T. D., Dong, S. & Brown, S. (2020). Suitability of energy storage with reversible solid oxide cells for microgrid applications. *Energy Conversion and Management*, 226, 113499. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113499.

Ilyushin, P. V. (2020). Prospects of using and problems of integrating distributed energy sources in grids. *Bibliotekha elektrotehnika [Library of electrical engineering]*, 8(260), 1–116. (In Russ.)

IRENA. (2018). *Power System Flexibility for the Energy Transition, Part 1: Overview for policy makers*. International Renewable Energy Agency. Retrieved from: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA\\_Power\\_system\\_flexibility\\_1\\_2018.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA_Power_system_flexibility_1_2018.pdf) (Date of access: 10.04.2022).

IRENA. (2022). *Smart Electrification with Renewables: Driving the transformation of energy services*. International Renewable Energy Agency. Retrieved from: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Feb/IRENA\\_Smart-Electrification\\_Renewables\\_2022.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Feb/IRENA_Smart-Electrification_Renewables_2022.pdf) (Date of access: 02.05.2022).

Khokhlov, A. A., Melnikov, Yu. V., Veselov, F. V., Kholkin, D. V. & Datsko, K. A. (2018). *Raspredeleonnaya energetika v Rossii: potentsial razvitiya [Distributed energy in Russia: development potential]*. Moscow: Energy Center of the Moscow School of Management SKOLKOVO, 87. (In Russ.)

Knyagin, V. N. & Kholkin, D. V. (Eds.). (2017). *Tsifrovoy perekhod v elektroenergetike Rossii: ekspertno-analiticheskiy doklad [Digital transition in the electric power industry of Russia: expert and analytical report]*. Moscow: Center for Strategic Research, 47. (In Russ.)

Kuklin, A. A., Myzin, A. L., Pykhov, P. A. & Potanin, M. M. (2013). Diagnostics and mechanisms of energy increase security in Russia. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta [Transbaikal State University Journal]*, 10, 134–149. (In Russ.)

- Kulikov, A. L., Ilyushin, P. V. & Loskutov, A. A. (2021). High-Performance Sequential Analysis in Grid Automated Systems of Distributed-Generation Areas. *Russian Electrical Engineering*, 92(2), 90–96.
- Makarov, A. A., Mitrova, T. A. & Kulagin, V. A. (2021). Long-term development of the global energy sector under the influence of energy policies and technological progress. *Russian Journal of Economics*, 6(4), 347–357.
- Mazurova, O. V. & Galperova, E. V. (2018). Long-term trends in energy consumption in the main sectors of the economy. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya [Energy: economics, technology, ecology]*, 11, 22–28. (In Russ.)
- Papkov, B. V., Osokin, V. L. & Kulikov, A. L. (2018). About the features of small and distributed generation in the intellectual electric power industry. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University]*, 4(82), 119–131. (In Russ.)
- Quint, R., Dangelmaier, L., Green, I., Edelson, D., Ganugula, V., Kaneshiro, R., ... Stringer, N. (2019). Transformation of the Grid: The Impact of Distributed Energy Resources on Bulk Power Systems. *IEEE Power and Energy Magazine*, 17, 35–45.
- Recaldea, A. A. & Alvarez-Alvarado, M. S. (2020). Design optimization for reliability improvement in microgrids with wind – tidal – photovoltaic generation. *Electric Power Systems Research*, 188, 106540. DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106540.
- Samoylenko, V., Firsov, A., Pazderin, A. & Ilyushin, P. (2021). Distribution grid future planning under uncertainty conditions. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 19, 499–504.
- Taraborin, R. S. (2020). State policy of Russia in the field of gas supply: characteristics and prospects. *Ekonomika i sotsium [Economics and society]*, 72, 188–194. (In Russ.)
- Tungadio, D. H. & Sun, Y. (2020). Predictive controller for interconnected microgrids. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14, 4273–4283.
- Tungadio, D. H., Bansal, R. C. & Siti, M. W. (2017). Optimal control of active power of two microgrids interconnected with two AC tie-lines. *Electric Power Components and Systems*, 45(19), 2188–2199.
- Volkova, E. D., Podkovalnikov, S. V. & Chudinova, L. Yu. (2014). System Effects of Integration of Electric Power Complexes in CIS Countries. *Problemy prognozirovaniya [Studies on Russian Economic Development]*, 2, 33–43. (In Russ.)
- Voropai, N. (2021). Electric power system transformations: A review of main prospects and challenges. *Energies*, 13(221), 5639.
- Voropai, N. I., Stennikov, V. A. & Barakhtenko, E. A. (2019). Integrated energy systems: Challenges, trends, philosophy. *Problemy prognozirovaniya [Studies on Russian Economic Development]*, 5, 39–49. (In Russ.)

### Информация об авторах

**Бык Феликс Леонидович** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет; Scopus Author ID: 6508286678; <https://orcid.org/0000-0002-6878-9461> (Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, пр-т. К. Маркса, 20, корп. 2; e-mail: felixbyk@hotmail.com).

**Мышкина Людмила Сергеевна** — кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет; Scopus Author ID: 57193879499; <https://orcid.org/0000-0002-5121-4143> (Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, пр-т. К. Маркса, 20, корп. 2; e-mail: lsmyskhina@gmail.com).

**Кожевников Михаил Викторович** — доктор экономических наук, доцент, зав. кафедрой систем управления энергетикой и промышленными предприятиями Института экономики и управления, Уральский федеральный университет; Scopus Author ID: 55805368400; <https://orcid.org/0000-0003-4463-5625> (Российская Федерация, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: m.v.kozhevnikov@urfu.ru, np.fre@mail.ru).

### About the authors

**Felix L. Byk** — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automated Electric Power Systems, Novosibirsk State Technical University; Scopus Author ID: 6508286678; <https://orcid.org/0000-0002-6878-9461> (20/2, K. Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation; e-mail: felixbyk@hotmail.com).

**Lyudmila S. Myshkina** — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Automated Electric Power Systems, Novosibirsk State Technical University; Scopus Author ID: 57193879499; <https://orcid.org/0000-0002-5121-4143> (20/2, K. Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation; e-mail: lsmyskhina@gmail.com).

**Mikhail V. Kozhevnikov** — Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor, Head of the Academic Department of Energy Industry and Industrial Enterprise Management Systems, Graduate School of Economics and Management, Ural Federal University; Scopus Author ID: 55805368400; <https://orcid.org/0000-0003-4463-5625> (19, Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; e-mail: m.v.kozhevnikov@urfu.ru, np.fre@mail.ru).

Дата поступления рукописи: 11.07.2022.

Прошла рецензирование: 11.08.2022.

Принято решение о публикации: 15.12.2022.

Received: 11 Jul 2022.

Reviewed: 11 Aug 2022.

Accepted: 15 Dec 2022.