

ЭФФЕКТЫ ИНТЕГРАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Ф.Л. Бык, Л.С. Мышкина

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-5121-4143>, Lsmyskhina@gmail.com

Резюме: Энергетика России трансформируется, в след тотальной электрификации пришла газификация, кардинально изменившая топливный ландшафт и позволившая предприятиям различных сфер экономики создавать собственные источники энергии на основе газотурбинных и газопоршневых когенерационных установок. Все больше появляется сбалансированных локальных интеллектуальных энергосистем (ЛИЭС) различного назначения, чаще работающих автономно, так как процесс их объединения с ЕЭС России невозможен без выдачи мощности и энергии, что противоречит интересам генерирующих компаний, территориальных сетевых организаций и системного оператора. Преодоление созданных крупными игроками электроэнергетики административных и технологических барьеров и препятствий снижает техническую и экономическую эффективность ЛИЭС, способных приносить значимые полезные системные эффекты. **ЦЕЛЬ.** Обоснование получаемых системных эффектов от интеграции ЛИЭС **МЕТОДЫ.** Системный подход для выявления получаемых эффектов интеграции ЛИЭС с ЕЭС России. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** ЛИЭС рассматриваются в качестве объектов распределенной электроэнергетики, выполняющих определенные системные функции, что сопровождается изменением свойств надежность, экономичность и экологичность производства и передачи тепловой и электрической энергии, что обуславливает получение различных эффектов. Наличие и размер эффектов определяют вид и тип ЛИЭС. Показано, что определенными преимуществами обладает интеграция коммунальных ЛИЭС, созданных для энергоснабжения населения и приравненных к нему потребителей. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Интеграция коммунальных ЛИЭС позволяет повысить доступность и бесперебойность электроснабжения, снизить негативное влияние вне рыночной надбавки и перекрестного субсидирования, повысить равномерность графиков нагрузки генерирующего и сетевого оборудования, что повышает эффективность ЕЭС России.

Ключевые слова: распределенная энергетика; локальная интеллектуальная энергосистема; теплоснабжение; электроснабжение; надежность; экономичность; экологичность; эффект.

Для цитирования: Бык Ф.Л., Мышкина Л.С. Эффекты интеграции локальных интеллектуальных энергосистем // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-3-15.

EFFECTS OF LOCAL INTELLIGENT ENERGY SYSTEMS INTEGRATION

FL. Byk, LS. Myshkina

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5121-4143>, Lsmyskhina@gmail.com

Abstract: The energy sector of Russia is transforming, followed by total electrification and

gasification, which has radically changed the fuel landscape and allowed enterprises in various sectors of the economy to create their energy sources based on gas turbine and gas piston cogeneration plants. There are more and more balanced local intelligent energy systems for various purposes, more often operating autonomously, since the process of their integration with the unified energy system of Russia is impossible without power and energy output, which is contrary to the interests of generating companies, territorial grid organizations and the system operator. Overcoming the administrative and technological barriers and obstacles created by significant players in the electric power industry reduces the technical and economic efficiency of local intelligent energy systems that can bring considerable beneficial systemic effects. **THE PURPOSE** Substantiation of the obtained system effects from integrating local intelligent energy systems. **METHODS.** A systematic approach to identify the effects of the integration of local intelligent energy systems with the unified energy system of Russia. **RESULTS.** Local intelligent energy systems are considered objects of distributed electric power industry that perform certain system functions, which is accompanied by a change in the properties of reliability, efficiency and environmental friendliness of the production and transmission of heat and electricity, which leads to various effects. The presence and size of the effects are determined by the type and type of the local intelligent energy system. It is shown that the integration of communal local intelligent energy systems, created for the energy supply of the population and equivalent consumers, has a certain advantage. **CONCLUSION.** The integration of communal local intelligent energy systems makes it possible to increase the availability and uninterrupted power supply, reduce the negative impact of off-market surcharges and cross-subsidization, improve the uniformity of load schedules for generating and grid equipment, which increases the efficiency of the unified energy system of Russia.

Keywords: distributed energy; local intelligent energy system; heat supply; power supply; reliability; efficiency; environmental friendliness; effect.

For citation: Byk FL, Myshkina LS. Effects of local intelligent energy systems integration. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24 (1): 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-3-15.

Введение

Новый энергетический переход (*Energy Transition*) часто называют «3D-моделью энергии», направленной на декарбонизацию, децентрализацию и цифровизацию [1], что должно позволить достигать целей устойчивого развития и повысит отечественный индекс Энергетической Трилеммы.

Индекс Энергетической Трилеммы отражает соответствие принятой в стране энергетической политики определенным целям. Эффективность энергетической политики оценивается по совокупности показателей, сгруппированных по трем направлениям:

1. Энергетическая безопасность.
2. Справедливый доступ к энергии (физическая и финансовая доступность).
3. Экологическая устойчивость.

Очевидно, что российская энергетическая политика разрабатывается в зависимости от своих внутренних условий, обусловленных природными ресурсами, географическим положением, социально-экономическими условиями и другими факторами, которые по субъектам РФ имеют кардинальные различия. Это важное отличие европейских стран и РФ, состоящей из субъектов сопоставимых по своим размерам и природно-климатическим условиям с некоторыми странами. Наличие существенных различий означает, что не существует единого, универсального пути для успешного энергетического перехода для всех регионов страны и необходимо для каждого из них определять собственный наилучший путь энергетической политики с учетом реальной ситуации и приоритетов, обеспечивающих устойчивое развитие субъектов РФ и страны в целом.

Однако это не означает, что органы законодательной и исполнительной власти каждого регионов не должны учиться друг у друга, узнавая, где и какая политика работает и при каких условиях может быть успешной и результативной, так как цель повышения эффективности производства тепловой и электрической энергии, энергосбережения при их передаче является общей. Очевидно, что региональная энергетическая политика может оказывать значимое влияние на потребителей, стимулируя их менять модель своего поведения на розничном рынке электроэнергии. Не

принимая роль федеральных органов власти, следует отметить, что от субъектов федерации во многом зависит достижение целей устойчивого развития регионов. Следует указать следующие цели, достижение которых определяет состояние региональной энергетики:

- обеспечение доступа к недорогостоящим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех;
- создание прочной инфраструктуры, включая содействие внедрению инноваций;
- обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов.

В качестве одного из направления энергетического перехода в России и за рубежом рассматриваются включение в состав энергосистем объектов распределенной энергетики (ОРЭ), что позволяет добиться [2]:

- децентрализации производства электроэнергии;
- распространения инновационных технологий, направленных на повышение энергетической эффективности производства энергии и энергосбережения при ее передаче;
- формирования интеллектуальных энергосистем на основе использования цифровых технологий в системах управления;
- изменения модели поведения потребителей, стимулируя их трансформацию в активные субъекты рынка электроэнергии.

В качестве первых ОРЭ возникла малая распределенная генерация, работающая на углеводородном топливе и возобновляемых источниках энергии. Их включение в состав систем электроснабжения промышленных, коммерческих, сельскохозяйственных потребителей привело к появлению соответствующих интеллектуальных энергосистем хозяйствующих субъектов (ИЭС ХС), включающих генерацию тепловой и электрической энергии, тепловые и электрические сети, а также тепло и электроприемники, различной категории надежности.

Инвестиционная привлекательность ИЭС ХС обуславливается повышением технологической и экономической эффективности энергоснабжения. С появлением собственного источника электроэнергии повышается надежность электроснабжения, а кроме этого, снижаются затраты на приобретение электроэнергии с розничного рынка у энергосбытовых компаний. Последнее достигается за счет исключения оплаты услуг за передачу электроэнергии и надбавки от перекрестного субсидирования, которые влияют на стоимость электроэнергии, получаемой из систем централизованного электроснабжения. Приобретая определенную энергетическую независимость, многие хозяйствующие субъекты остаются присоединенными к электрическим сетям, переходя на комбинированное электроснабжение от собственных источников и централизованной системы, снижая объем закупаемой электроэнергии с розничного рынка.

Одновременно с появлением ИЭС ХС наблюдается процесс, когда на определенных территориях создаются сбалансированные локальные интеллектуальные энергосистемы (ЛИЭС), способные обеспечить потребителей тепловой и электрической энергии в полном объеме и с требуемым уровнем надежности. ЛИЭС, создаваемые по причине технической невозможности их интеграции в состав ЕЭС России, принято называть изолированными энергосистемами. Однако в последнее время в зоне действия ЕЭС России можно наблюдать появление автономно функционирующих ЛИЭС, то есть в так называемом «островном» режиме. В этих случаях отсутствие электрической связи с системами централизованного электроснабжения в основном обусловлено экономическими причинами, например высокой стоимостью технологического присоединения потребителей к сетям и особенно в дефицитных энергорайонах, где нет достаточно объема свободных мощностей на центрах питания крупных ПС. Зачастую указанные затраты сопоставимы и даже превышают капиталовложений в создание ЛИЭС, даже с учетом необходимых резервов в генерации и в сетевом комплексе, расходов на создание интеллектуальных систем управления на основе цифровизации.

По оценкам рабочей группы «Энерджинет» Национальной технологической инициативы создание объектов распределенной энергетики, позволит до 2035 года добиться снижения цен на электроэнергию на 30–40% [2], и при этом повысить надежность электроснабжения потребителей. Однако этот процесс требует комплексных исследований технических, экономических и социальных аспектов.

Однако вопрос интеграции локальных интеллектуальных энергетических систем (ЛИЭС) в ЕЭС остается актуальным, как один из вариантов развития энергосистемы страны. Научно-теоретическая значимость данной работы состоит в определении эффектов от интеграции ЛИЭС, выявить, где и как это целесообразно осуществлять с позиций обеспечения доступа к недорогостоящим и надежным источникам энергии.

Цель исследования состоит в обосновании системных эффектов от интеграции

ЛИЭС, для достижения которой решались следующие задачи:

- Выявление эффектов, получением которых сопровождается интеграция локальных интеллектуальных энергосистем в ЕЭС России;
- Выбор технологических решений, обеспечивающих согласованность параллельной синхронной работы децентрализованной ЛИЭС с централизованной ЕЭС России.

За рубежом наиболее близким аналогом ЛИЭС являются микрогрид, но они принципиально различаются. В отличие от России, на западе доминирует ориентация на создании микрогрид на базе малой распределенной генерации работающей на возобновляемых источниках энергии. В российских условиях, особенно в регионах с резко континентальным климатом, для которых характерны большие амплитуды колебаний температур, продолжительные и очень холодные зимы, наиболее целесообразно использование когенерационных технологий, которые, как известно, на 30-50% эффективнее раздельного производства тепловой и электрической энергии [3]. В этом состоят отличия зарубежных исследований [4, 5, 6, 7, 8, 9] от российских [10, 11, 12]. Для отечественных ученых и специалистов возникает сложная проблема обеспечить доступ к недорогостоящему и надежному электро- и теплоснабжению, в сочетании с экологичным производством энергии.

Предметом исследований являются системные эффекты, которыми сопровождается интеграция ЛИЭС в состав ЕЭС, то есть сделана попытка выявить и оценить насколько повышается доступность, надежность и экологичность от их объединения. Практическая значимость полученных результатов позволит внести изменения для выполнения «Схем и программ перспективного развития электроэнергетики субъектов РФ» и «Схем теплоснабжения муниципальных образований».

Материалы и методы

В основе исследования лежит методология системного подхода с использованием методов системного анализа, теория управления изменениями и идея организации. Представление о вероятности и математической статистике, теории надежности, математических и имитационных методах моделирования играет важную роль в анализе полученных эффектов.

В данной работе локальные интеллектуальные энергосистемы рассматриваются как техническая система связанных объектов электроэнергетики, выполняющих функции электроснабжения в зоне своей деятельности. В состав ЛИЭС входит мини-ТЭЦ с электрической мощностью до 25 МВт, использующие в качестве первичного энергоресурса природный, попутный нефтяной, доменный, конверторный, коксовый, свалочный и другой газ. Ограничение на электрическую мощность связано с условием работы на розничном рынке. Генераторы мини-ТЭЦ работают с генераторным напряжением 10(6) кВ, что позволяет создавать ЛИЭС на основе сети 0,4–10 кВ, которую принято относить к распределительным сетям среднего и низкого напряжения.

Результаты и Обсуждение

Очевидно, что задача интеграции решается относительно ЛИЭС в зоне действия ЕЭС России и работающих в «островном» режиме. Основным отличием таких ЛИЭС от других объектов распределенной энергетики является их самодостаточность, обуславливающая возможность бездефицитной работы с требуемой балансовой и режимной надежностью как параллельно с ЕЭС, так и автономно.

Повышение надежности обеспечивается появлением двух нормальных работоспособных схемно-режимных состояний, что позволяют повысить бесперебойность электроснабжения потребителей, входящих в ЛИЭС.

Экономическая эффективность интеграции ЛИЭС в основном определяется:

- повышением доходов от продажи избытков электроэнергии энергосбытовыми компаниям, субъектам розничного рынка или сторонним потребителям, самостоятельно оплачивающих сетевым компаниям услуги за передачу электроэнергии;
- снижением расходов на топливо, так как при повышении загрузки когенерационных агрегатов выработка электроэнергии сопровождается дополнительным производством тепла, что снижает загрузку котельного оборудования, для сохранения заданного теплоснабжения.

Естественно, интеграция ЛИЭС ведет к сокращению объема поставок с оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ), где снизится загрузка менее эффективных угольных ТЭС. Системными эффектами будет снижение цены на электроэнергию на ОРЭМ и сокращение объемов вредных выбросов CO₂ в окружающую среду из-за снижения объема сжигаемого топлива. Поэтому реализация проектов по интеграции ЛИЭС во многом соответствуют ESG критериям, что повышает инвестиционную привлекательность технических решений по их присоединению к ЕЭС.

Очевидно, что размер указанных эффектов интеграции ЛИЭС различаются по

регионам. Это зависит от целей создания ЛИЭС, от используемых когенерационных технологий, видов топлива и других факторов. Важными являются соотношение затрат на производство электроэнергии и ее стоимости на розничном рынке, размер установленного тарифа на тепловую энергию и сложившиеся цены на используемое топливо, удаленность от районных центров питания (ЦП) и распределительных узлов (РУ) сети 10(6) кВ территориальной сетевой организации. Существенное значение имеет характер энергорайона, в который может быть интегрирована ЛИЭС - дефицитный или избыточный.

Очевидно, ощутимым преимуществом для интеграции имеют ЛИЭС, где выработка энергии осуществлена на газотурбинных и газопоршневых установках (ГТУ и ГПУ), а в качестве топлива используются промышленные, сельскохозяйственные отходы или побочные продукты основного производства. Обусловлено это полезным и значимым эффектом от дополнительной утилизации вторичных энергоресурсов, выброс которых наносит вред окружающей среде и, следовательно, сопровождается постоянно растущими экологическими сборами. Повышение экологичности ЛИЭС мотивирует хозяйствующих субъектов, создавших такие ЛИЭС, инвестировать либо в расширение производства, что сопровождается ростом электропотребления, либо интегрироваться в состав ЕЭС для выдачи избытков электроэнергии на розничный рынок. Например, для отечественных вертикально-интегрированных нефтяных компаний таким стимулом служит размер санкций за факельное сжигание попутного нефтяного газа (ПНГ), объем которых сокращается при дополнительном производстве и отпуске электроэнергии. Поэтому начиная с 2012 года, в России наблюдается рост доли утилизации ПНГ в технологических процессах, в том числе для производства электричества и тепла, рисунок 1 [13]. В настоящее время нефтедобывающие компании располагают ОРГ с суммарной установленной мощностью более 2 ГВт.

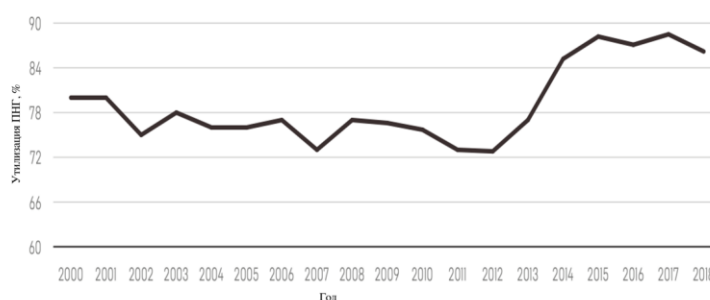


Рис. 1. Утилизация попутного нефтяного газа в технологических процессах, в том числе для производства электричества и тепла, %

Fig. 1. Utilization of associated petroleum gas in technological processes, including for the production of electricity and heat, %

Во многом неоднозначна целесообразность интеграции ЛИЭС, где для генерации электроэнергии используется природный газ. Очевидно, что большинство таких ЛИЭС находится в газифицированных регионах страны, где за последние годы коренным образом изменился топливный ландшафт. По итогам 2021 года, уровень газификации субъектов Российской Федерации составил 71% [14, 15, 16]. Целевым показателем является достижение 82,9 %: к 2035 году, что указано в Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. №1523-р. На рисунке 2 показана доступность природного газа на территории России [15].

В регионах, находящихся в Сибирском, Уральском и Центральном Федеральных округах, где в силу климатических условий наблюдается высокий спрос на тепловую энергию, широкое распространение нашли газовые котельные различной мощности, в том числе от 20 до 100 Гкал/час. Соотношение спроса на тепловую и электрическую мощность в малых, средних, больших, крупных и крупнейших городах в указанных регионах составляет от 3:1 до 5:1. В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 31.12.2009 № 1221 «Об утверждении Правил установления требований энергетической эффективности товаров, работ, услуг при осуществлении закупок для обеспечения государственных и муниципальных нужд» предусматривается их реконструкция, направленная на обязательный перевод на когенерационный режим работы. Поэтому следует ожидать роста числа мини-ТЭЦ, что позволит решить проблему неудовлетворительного морального и физического состояния котельных и осуществить переход к теплофикации на новой технологической основе.

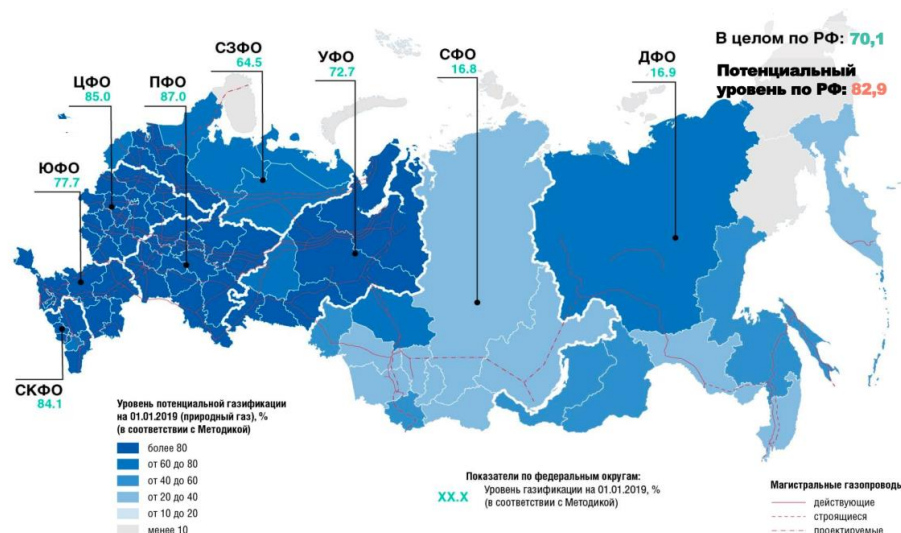


Рис.2. Уровень газификации в России на 1 января 2020 года

Fig. 2. The level of gasification in Russia as of January 1, 2020

Очевидно, что трансформация котельных в мини-ТЭЦ приведет к повышению энергоэффективности производства энергии и следовательно к сокращению расходов топлива. Значение коэффициентов полезного использования топлива (КПИТ) во многом зависит от режима загрузки когенерационных установок, чем выше их коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), тем выше КПИТ.

Зачастую субъекты, владеющие мини-ТЭЦ и тепловыми сетями, выполняют функции единой теплоснабжающей организацией (ЕТО) на определенной территории и одновременно являются субъектами розничного рынка электроэнергии в качестве производителя электроэнергии. В силу действующего на розничном рынке порядка розничным генераторам экономически более выгодно продавать электроэнергию конечным потребителям, а не гарантирующему поставщику, действующему в той же зоне, где расположены мини-ТЭЦ. Такое положение создает экономические предпосылки для создания коммунальных ЛИЭС, осуществляющих электроснабжение населения и приравненных к нему потребителей. Очевидно, чем выше размер установленного субъектами РФ тарифа для населения, тем экономически обоснованным является создание коммунальных ЛИЭС. В приведенной ниже таблице 1 показаны по пять «холодных» регионов с максимальными и минимальными тарифами для населения.

Таблица 1

Тарифы на электроэнергию для населения в зоне действия ЕЭС РФ в июле 2019 года.

| Субъект РФ | Количество электроэнергии, доступное на среднемесячную зарплату в регионе, кВт·ч | Тариф без льгот за пользование электроплитами, руб./ 100 кВт·ч |
|---|--|--|
| Пятерка регионов с максимальными тарифами | | |
| Республика Калмыкия | 4876 | 483 |
| Республика Адыгея | 5079 | 481 |
| Ивановская область | 5115 | 450 |
| Республика Алтай | 5300 | 523 |
| Псковская область | 5578 | 440 |
| Пятерка регионов с минимальными тарифами | | |
| Иркутская область | 34436 | 111 |
| Ямало-Ненецкий автономный округ | 29741 | 287 |
| Ханты-Мансийский автономный округ — Югра | 21977 | 287 |
| Мурманская область | 18885 | 276 |
| Красноярский край | 15891 | 258 |

Следует отметить, что коммунальные ЛИЭС обычно находятся в непосредственной близости от районных ПС и зачастую создаются в дефицитных энергорайонах, где обычно максимальна стоимость технологического присоединения новых потребителей к сетям ТСО. Последнее зачастую обуславливает экономическую эффективность появления ЛИЭС. Для предприятий, относящихся к малому и среднему предпринимательству, коммунальные ЛИЭС обладают привлекательностью, ввиду более низкой стоимости технологического присоединения и цены на электроэнергию. Немаловажна и стабильность цены в суточном, сезонном и годовом временных разрезах. Необходимо указать на еще одну важную роль коммунальных ЛИЭС. Осуществляя электроснабжение населения, коммунальные ЛИЭС вносят определенный вклад в снижение негативного влияния перекрестного субсидирования, которое возложено на субъекты экономики в рамках социальной политики. Этот системный эффект можно получить и без интеграции коммунальных ЛИЭС, что позволяет говорить об их преимуществах относительно других по назначению ЛИЭС.

Интеграция промышленных, сельскохозяйственных, коммерческих и коммунальных ЛИЭС сопровождается экономическими эффектами, в основе которых лежат технические свойства ЛИЭС [10, 12, 17–19, 20–23]. Наличие системных эффектов обусловлено возможностью обеспечить:

- разгрузку дефицитных центров питания, осуществляя выдачу мощности в энергорайон. Системный эффект достигается от снижения инвестиционной составляющей в тарифе на передачу электроэнергии, так как сокращается размер необходимых инвестиций на развитие сетевого комплекса ТСО;

- поддержание узловых напряжений в соответствии с нормативами, используя для этого регуляторы возбуждения генераторов ЛИЭС. Системный эффект состоит в сокращении потерь в распределительных электрических сетях, компенсация которых обычно заложена в тариф на передачу электроэнергии.

- выравнивание графика загрузки районных ПС питающих потребителей энергорайона, осуществляя регулирование выдачи мощности из ЛИЭС. Системные эффекты состоят:

- в снижении максимальной нагрузки и повышении плотности графика нагрузки ЕЭС, что ведет к снижению размера требуемых маневренных генерирующих мощностей;

- в повышении эффективности и долговечности работы силовых трансформаторов ПС, так как равномерная нагрузка электроустановок сопровождается снижением потерь и темпов износа паркового ресурса, следовательно, поддерживается индекс технического состояния.

- снижение индикативных показателей надежности электроснабжения в энергорайоне - индекса средней продолжительности прерывания системы и индекса средней частоты прерывания системы (*SAIDI*, *SAIFI*) за счет резервирования со стороны ЛИЭС. Системный эффект состоит в получении ТСО дополнительных доходов, от повышения тарифа на передачу электроэнергии за рост качества и надежности электроснабжения.

Наличие указанных и других системных эффектов и их размер влияют на решение об интеграции ЛИЭС, которое во многом зависит от отношения со стороны региональной ТСО и РДУ, обеспечивающих оперативно-диспетчерское управление в зоне нахождения ЛИЭС. Проблема обеспечения параллельной работы ЛИЭС в составе ЕЭС России достаточно сложная техническая задача, сопровождаемая рядом рисков. Технические условия объединения ЛИЭС кардинально отличаются от условий присоединения распределенной генерации. Если присоединение генерации к сетям регламентируется и предполагает выполнение и согласование соответствующей «Схемы выдачи мощности», то для объединения ЛИЭС и ЕЭС России отсутствует утвержденный порядок, нет методических указаний и рекомендаций для решения комплекса специфических задач. Очевидно, что пока не будет технологического регламента интеграции ЛИЭС, пока не появятся четкие правила распределения системных эффектов, процесс интеграции ЛИЭС будет наталкиваться на ведомственные барьеры и препятствия, преодоление которых потребует определенных усилий и соответствующих затрат, снижающих инвестиционную привлекательность интеграции ЛИЭС.

Во многом техническая проблема объединения ЛИЭС с ЕЭС России решается разработанной автоматикой опережающего сбалансированного отделения [17]. Указанная автоматика представляет собой программно-технический комплекс, обеспечивающий режимное и противоаварийное управление в двух указанных выше нормальных состояниях, а также переход из одного нормального состояния в другое и обратно. Данная автоматика выполняет функции децентрализованной интеллектуальной системы

управления нормальными и послеаварийными режимами, исключающей отрицательное влияние одной энергосистем на другую при технологических нарушениях. Основное требование к указанной автоматике - обеспечение быстрого действия отключения ЛИЭС от ЕЭС России при технологических нарушениях в электрической сети. Она не исключает, но использует способность агрегатной автоматики, обеспечивающей устойчивую работу генераторов или их отключение для сохранения в работоспособном состоянии.

Благодаря использованию указанной автоматики в 2021 году выполнена интеграция коммунальной ЛИЭС в г. Новосибирске. В состав ЛИЭС входит многоагрегатная мини-ТЭЦ, состоящая из 5 газопоршневых установок Caterpillar G3520C мощностью 2000 кВт каждая. Подробная информация о пилотной ЛИЭС указана в таблице 2. Газопоршневые установки работают в когенерационном режиме с утилизацией тепловой энергии. Основным видом топлива – природный газ. Дизельное топливо, используется только на дизельных агрегатах, служащих резервом для электроснабжения собственных нужд.

Коммунальная ЛИЭС обеспечивает в микрорайоне «Березовый» в г. Новосибирск население и предприятия малого и среднего бизнеса тепловой и электрической энергией, как это указано в таблице 3. ЛИЭС была создана в 2012 году и работала в островном режиме до 2020 года.

Таблица 2

Характеристики пилотной ЛИЭС

| № п/п | Оборудование | Мощность, кВт | Количество, шт. | Установленная мощность, кВт |
|----------------------------|--|----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| Электрическое оборудование | | | | |
| 1.1 | Газопоршневая установка G3520 E «Caterpillar» | 2000 (электрическая мощность) | 5 | 10 000 (электрическая энергия) |
| | | 2150 (тепловая мощность) | | 10 750 (тепловая энергия) |
| 1.2 | Дизель-генераторная установка ДГУ 1600-10 «Caterpillar» | 1600 | 2 | 3 200 |
| Котельное оборудование | | | | |
| 2.1 | Котлоагрегат «Buderus» | 11 200 | 2 | 22 400 |
| 2.2 | Котлоагрегат «Термотехник - ТТ 100» | 2 500 | 2 | 5 000 |
| 2.3 | Котлоагрегат «Buderus» | 19 200 | 2 | 38 400 |

Использование технического решения обеспечивающей параллельную работу с ЕЭС России позволяет осуществить ограничение токов короткого замыкания, токов замыкания на землю, предотвращение нарушений устойчивости параллельной работы с возникновением асинхронных режимов, исключение ударных моментов на валах синхронных машин, согласование релейной защиты внешней сети с защитами и автоматикой ЛИЭС [17, 21, 22].

Таблица 3

Структура потребителей электрической энергии ЛИЭС «Березовое»

| № пп | Тип нагрузки | Доля |
|------|------------------------------|------|
| 1 | Коммунально-бытовая нагрузка | 60 % |
| 2 | Промышленная нагрузка | 25 % |
| 3 | Двигательная нагрузка | 10 % |
| 4 | Осветительная нагрузка | 5 % |

Экономическая природа полученных эффектов от интеграции ЛИЭС обусловлена следующим:

- увеличением на 18% объема выработки электрической энергии на когенерационных агрегатах, что позволило повысить КИУМ и КПИТ энергоустановки;
- получением дополнительных доходов от энергосбытовой компании, закупающей отпускаемые избытки электроэнергии для поставки на розничный рынок;
- отказом от резервных дизельных агрегатов и их использование для обеспечения надежности электроснабжения электроприемников первой категории надежности, то есть для собственных нужд другой котельной ООО «Генерация Сибири», что позволило

сократить капиталовложения на развитие бизнеса.

- снижением затрат на приобретение 15% объема природного газа, добившись сокращения его использования на котельном оборудовании за счет его вытеснения из покрытия тепловой нагрузки и замещением теплом, получаемого от когенерационных агрегатов.

- оказанием системных услуг в части мультиагентного управления узловыми напряжениями и предоставления регулировочного ресурса в размере 500 кВт Агрегатору управления спросом на электрическую энергию в ЕЭС России и др.

Указанные экономические эффекты позволили инвестору обеспечить окупаемость реализации проекта на интеграцию коммунальной ЛИЭС за 7 месяцев. Из важных эффектов, который предстоит монетизировать, следует отметить ожидаемое повышение надежности электроснабжения потребителей. Расчеты показали, что индексы средней продолжительности и средней частоты прерывания электроснабжения снизятся минимум на 10%. Это результат того, что потребители в составе ЛИЭС получили двухстороннее независимое питание. По существу, электроснабжение потребителей третьей категории надежности будут обеспечивать с уровнем надежности соответствующий второй категории.

Особо следует отметить достигнутые экологические эффекты. Его предлагается рассчитать исходя из сокращения выбросов CO₂ на угольной ТЭС, полученных благодаря отпущенной коммунальной ЛИЭС электроэнергии на розничный рынок.

Для определения величины выбросов CO₂ воспользуемся коэффициентами для расчета выбросов CO₂ при сжигании ископаемого топлива, согласно Методике расчета выбросов парниковых газов, указанной в Национальном докладе РФ о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, выброс CO₂ в весовых единицах может быть рассчитан исходя из объемов сжигаемого топлива:

$$E = M \cdot K ,$$

где E - выброс CO₂ в весовых единицах (тонн, тыс.м³); M - фактическое потребление топлива (тонн, тыс.м³); K - коэффициенты для расчета выбросов CO₂ при сжигании ископаемого топлива, для природного газа K= 1,85 т CO₂/(тыс. м³), для каменного угля K=2,7 т CO₂/т, в зависимости от марки угля.

Выработка 1000 МВтч на ГПУ сопровождается удельным расходом газа 378 нм³/ч (что соответствует расходу топлива при загрузке на 75% ГПУ G3520 E Caterpillar). Следовательно, для производства необходимого объема электрической энергии при принятой загрузке 75% и установленной мощности 2 МВт, суммарный расход топлива составит 252 тыс.нм³. Выбросы энергоустановки составят 466,2 т.

Сокращении выработки на 1000 МВтч на ТЭС при удельном расходе топлива 300 г.у.т./кВтч приведет к экономии сжигаемого топлива на 390 т. Следовательно, уменьшение вредных выбросов составит 1 054, 7 тонн.

Таким образом, эффект сокращения выбросов парниковых газов за счет выработки электроэнергии на ГПУ коммунальной ЛИЭС, а не на ТЭС составляет:

$$\Delta E = 588,5 \text{ т}$$

Аналогичное сокращение парниковых газов возможно путем замещения части выработки электрической энергии на ТЭС выработкой на фотогальванических установках.

Сокращение CO₂ на 588,5 тонн возможно за счет сокращения расходов топлива (в расчетах принят каменный уголь) на 218 тонн., следовательно снижение выработки электрической энергии на ТЭС (ΔЭ) должно составить 558 МВтч.

Для выработки аналогичного объема электрической энергии солнечных электростанций, работающих с КИУМ 0,16, потребуется установка солнечной электростанции мощностью 398 кВт.

$$P_{\text{сэс}} = \frac{\Delta \text{Э}}{\text{КИУМ}_{\text{сэс}} \cdot 8760},$$

При средней удельной стоимости солнечных электростанций 1000\$/кВт, системный экологический эффект интеграции ЛИЭС, отпускающей на розничный рынок 1000 МВт*час в год составит 398 тыс. \$.

Заключение

Интеграция сбалансированных локальных энергосистем под управлением интеллектуальной децентрализованной системой управления сопровождается получением полезных и значимых системных экономических эффектов.

Интеграция локальных интеллектуальных энергосистем повышает эффективность функционирования ЕЭС России, в частности повышая равномерность графиков загрузки центров питания или предоставляя регулировочные ресурсы агрегаторам управления спросом на электроэнергию в ЕЭС России.

Интеграция локальной интеллектуальной энергосистемы в энергорайон, запитанный от дефицитных центров питания, позволяет сократить размер инвестиций, необходимых для расширения районных подстанций. Это приведет к снижению инвестиционной составляющей в сетевом тарифе и позволит перенаправить высвободившиеся средства на цифровизацию сетевого комплекса.

Важно отметить, что даже не интегрированные коммунальные локальные интеллектуальные энергосистемы порождают системный эффект снижая размер перекрестного субсидирования, что создает благоприятные условия для социально-экономического развития территорий, повышая доступность электроснабжения субъектов экономики.

Литература

1. Хохлов А., Мельников Ю., Веселов Ф., и др. Распределенная энергетика в России: потенциал развития. М: Энергетический центр управления Московской школы управления Сколково, 2018. 87 с. Доступно по: http://www.energsovet.ru/stat/skolko_vo_914.pdf Ссылка активна на 26 октября 2021.
2. Княгинин В.Н., Холкин Д.В. Цифровой переход в электроэнергетике России. Центр стратегических разработок, 2017. 47 с. Доступно по: https://www.csr.ru/uploads/2017/09/Doklad_energetika-Web.pdf Ссылка активна на 01 ноября 2021.
3. Дильман М.Д., Филиппов С.П. Требования к топливной эффективности перспективных когенерационных установок // Известия РАН. Энергия. 2021, №5, С. 102–111.
4. Recaldea A.A., Alvarez-Alvarado M.S. Design optimization for reliability improvement in microgrids with wind – tidal – photovoltaic generation // Electric Power Systems Research. 2020. V. 188, 106540. Доступно по: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779620303448> Accessed to: 18 november 2021.
5. Huty D., Dong S., Brown S. Suitability of energy storage with reversible solid oxide cells for microgrid applications // Energy Conversion and Management. 2020, V. 226, 113499. Available at: <https://eprints.whiterose.ac.uk/166255/> Accessed to: 29 october 2021
6. Tungadio D.H., Bansal R.C., Siti M.W. Optimal Control of Active Power of Two Micro-grids Interconnected with Two AC Tie-Lines // Electric Power Components and Systems. 2017. V. 45. pp. 2188–2199. Available at <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15325008.2017.1384940> Accessed to: 13 november 2021.
7. Tungadio D.H., Sun Y. Predictive controller for interconnected microgrids // Generation, Transmission & Distribution, 2020. V.14, pp. 4273-4283 Available at <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2019.1257> Accessed to: 15 july 2021
8. Abbey C., Cornforth D., Hatziargyriou N., Hirose K. Microgrids Operation for More Efficient Disaster Recovery // IEEE Power & Energy Magazine, 2014. V. 12(3), pp.67-76
9. Bella A., Farina M., Sandroni C., et al. Design of Aggregators for the Day-Ahead Management of Microgrids Providing Active and Reactive Power Services // IEEE Transactions on control systems technology, 2020. V. 28 (6), pp. 2616 - 2624. Available at <https://ieeexplore.ieee.org/document/8848405>. Accessed to:10 september 2021
10. Samoylenko V., Firsov A., Pazderin, A., Ilyushin P. Distribution grid future planning under uncertainty conditions // Renewable Energy and Power Quality Journal, 2021. V. 19, pp. 499–504.
11. Инновационная электроэнергетика – 21 / под ред. В.М. Батенина, В.В. Бушуева, Н.И. Воропая. М.: ИЦ «Энергия». 2017. 584 с.
12. Kulikov A.L., Ilyushin P.V., Loskutov A.A. High-Performance Sequential Analysis in Grid Automated Systems of Distributed-Generation Areas // Russian Electrical Engineering. 2021, V. 92(2), pp.. 90–96 Available at <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1068371221020073> Accessed to: 30 september 2021

13. Эффективность нефтяных компаний // Энергетический бюллетень. 2018 Доступно по: <https://ac.gov.ru/publications?period=-1&page=3> Ссылка активна на: 05 сентября 2021 г.

14. Тараборин Р.С. Государственная политика России в сфере газоснабжения: характеристика и перспективы // Экономика и социум. 2020, № 72, С. 188-194.

15. Новая модель газификации субъектов Российской Федерации / Министерство Энергетики РФ Доступно по: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiZ-dCXI671AhUrmIsKNHY26BeAQFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fminenergo.gov.ru%2Fsystem%2Fdownload-pdf%2F19744%2F131089&usq=AOvVaw2PZfAVgJT4mdp-oBlidZ1V> Ссылка активна на: 10августа 2021 г.

16. Новак заявил, что уровень газификации России по итогам 2021 года составил 72% // ТАСС, 12.01.2021 Доступно по: <https://tass.ru/ekonomika/13404071> Ссылка активна на: 13 января 2022 г.

17. Фишов А.Г., Ивкин Е.С., Гилев О.В., др. Режимы и автоматика минирид, работающих в составе распределительных электрических сетей ЕЭС // Релейная защита и автоматизация. 2021. № 3. С. 44-59.

18. Мышкина Л.С. Малая генерация – средство повышения живучести энергосистемы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017. Т. 19, № 1-2. С.23-30

19. Бык Ф.Л., Мышкина Л.С. Надежность объектов распределенной энергетики // Надежность и безопасность энергетики. 2021. Т. 14. № 1. С. 45-51.

20. Бык Ф.Л., Какоша Ю.В., Мышкина Л.С. Фактор надежности при проектировании распределительной сети// Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22, № 6. С.43-54

21. Карджаубаев Н.А., Фишов А.Г. Децентрализованное мультиагентное регулирование напряжения в электрических сетях // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018, № 6, С. 183-195.

22. Фишов А.Г., Гуломзода А.Х., Ивкин Э.С., и др. Синхронизация microgrid с внешней электрической сетью и между собой в нормальных и послеаварийных режимах при разных схемах объединения // Релейная защита и автоматика. 2021. № 2. С. 18-28.

23. Byk F. L., Myshkina L. S., Frolova Y. A. Effect of local power systems integration on the distribution network functions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021, V. 1019. 14 International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019), 012003.

Авторы публикации

Бык Феликс Леонидович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет.

Мышкина Людмила Сергеевна – канд. техн. наук, доцент кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет.

References

1. Khokhlov A, Melnikov Y, Veselov F, Kholkin D, Datsko K. Raspredelennaya energetika v Rossii: potencial razvitiya. M: Energy Management Center of the Moscow School of Management Skolkovo. 2018; 87. Available at: http://www.energsovet.ru/stat/skolkovo_914.pdf Accessed: 26 Oct 2021.

2. Knjagin VN, Holkin DV. Cifrovoy perehod v jelektroenergetike Rossii. Center for Strategic Research. 2017; 47. Available at: https://www.csr.ru/uploads/2017/09/Doklad_energetika-Web.pdf Accessed: 01 Nov 2021.

3. Dilman MD, Filippov SP. Requirements for the fuel efficiency of promising cogeneration plants *Izvestiya RAN. Energy*. 2021; 5, 102–111.

4. Recaldea AA, Alvarez-Alvarado M. S. Design optimization for reliability improvement in microgrids with wind – tidal – photovoltaic generation *Electric Power Systems Research*, 2020; 188, 106540. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779620303448> Accessed: 18 Nov 2021. doi :10.1016/j.epsr.2020.106540

5. Huty D, Dong S, Brown S. Suitability of energy storage with reversible solid oxide cells for microgrid applications *Energy Conversion and Management*. 2020; 226, 113499& Available at: <https://eprints.whiterose.ac.uk/166255/> Accessed: 29 Oct 2021. doi:10.1016/j.enconman.2020.113499
6. Tungadio DH, Bansal RC, Siti MW. Optimal Control of Active Power of Two Microgrids Interconnected with Two AC Tie-Lines *Electric Power Components and Systems*. 2017; 45, 2188–2199. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15325008.2017.1384940> Accessed: 13 Nov 2021 doi:10.1080/15325008.2017.1384940
7. Tungadio DH, Sun Y. Predictive controller for interconnected microgrids *Generation, Transmission & Distribution*, 2020; 14, 4273-4283 Available at: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2019.1257> Accessed: 15 Jul 2021 doi:10.1049/iet-gtd.2019.1257
8. Abbey C, Cornforth D, Hatziaargyriou N, et al. Microgrids Operation for More Efficient Disaster Recovery *IEEE Power & Energy Magazine*, 2014; 12 (3), 67-76 doi:10.1109/MPE.2014.2301514 .
9. Bella A, Farina M, Sandroni C, et al. Design of Aggregators for the Day-Ahead Management of Microgrids Providing Active and Reactive Power Services *IEEE Transactions on control systems technology*, 2020; 28 (6), 2616-2624. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8848405> Accessed: 10 Sept 2021. doi:10.1109/TCST.2019.2939992.
10. Samoylenko V, Firsov A, Pazderin A, et al. Distribution grid future planning under uncertainty conditions *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2021; 19, 499–504 doi:10.24084/repqj19.329
11. *Innovative electric power industry - 21* / ed. Batenin VM, Bushueva VV, Gurgling N.I. M.: EC "Energy"; 2017.
12. Kulikov AL, Ilyushin PV, Loskutov AA. High-Performance Sequential Analysis in Grid Automated Systems of Distributed-Generation Areas *Russian Electrical Engineering*. 2021; 92(2), 90–96 Available at: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1068371221020073> Accessed: 30 Sept 2021 doi:10.3103/S1068371221020073.
13. Jefferktivnost' neftjanyh kompanij // Jenergeticheskij bjulleten'. 2018 Available at: <https://ac.gov.ru/publications?period=-1&page=> Accessed: 05 Sept 2021.
14. Taraborin R.S. Gosudarstvennaja politika Rossii v sfere gazosnabzhenija: harakteristika i perspektivy *Economy and society*. 2020; 72; 188-194.
15. Novaja model' gazifikacii subektov Rossijskoj Federacii. / Ministerstvo jenergetiki Rossijskoj Federacii Available at: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiZ-dCXI671AhUrmIsKHYY26BeAQFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fminenergo.gov.ru%2Fsystem%2Fdownload-pdf%2F19744%2F131089&usq=AOvVaw2PZfAVgJT4mdp-oBIidZ1V> Accessed: 10 Aug 2021.
16. Novak zajavil, chto uroven' gazifikacii Rossii po itogam 2021 goda sostavil 72% // TASS, 12.01.2021. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/13404071> Accessed: 13 Jan 2022.
17. Fishov AG, Ivkin ES, Gilev OV, et al. Modes and automation of minigrid operating as part of the ups distribution electric networks. *Relay protection and automation*. 2021; 3; 44-59.
18. Myshkina LS. Small generation - a means of increasing the survivability of the power system. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2017; 19(1-2); 23-30.
19. Byk FL, Myshkina LS. Reliability of objects of distributed energy *Reliability and safety of energy*. 2021; 14(1), 45-51.
20. Byk FL, Kakosha YuV, Myshkina LS. Reliability factor in the design of a distribution network. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2020; 22 (6); 43-54.
21. Kyrdzhaubaev NA, Fishov AG. Decentralized multi-agent voltage regulation in electrical networks. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2018; 6:183-195.
22. Fishov AG, Ghulomzoda AH, Ivkin ES, et al. Synchronization of the microgrid with the external power grid and with each other in normal and post-emergency modes with different interconnection schemes. *Relay protection and automation*. 2021; 2, 18-28.

23. Byk FL, Myshkina LS, Frolova YA. Effect of local power systems integration on the distribution network functions *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1019, 012003. doi: 10.1088 / 1757-899X / 1019/1/012003.

Authors of the publication

Felix L. Byk – Novosibirsk state technical University, Novosibirsk, Russia.

Lyudmila S. Myshkina – Novosibirsk state technical University, Novosibirsk, Russia.

Получено *18.11.2022г.*

Отредактировано *04.03.2022г.*

Принято *09.03.2022г.*