

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 338.4:621.31

EDN: LKUBQW

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-330-345



Анализ подходов к объединению микросетей в энергетические сообщества

Е.В. Попова^{1✉}, Н.В. Томин²^{1,2}Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия

Резюме. Цель – определить и проанализировать ключевые особенности агрегации микросетей в энергетические сообщества в зависимости от преобладания промышленных и бытовых нагрузок. В работе были использованы методы литературного обзора и мета-анализа в области планирования, моделирования и управления микроэнергетических систем и их сообществ. Также применялся методологический подход, сочетающий методы многокритериального принятия решений и искусственного интеллекта. Эффективность предлагаемого подхода продемонстрирована на примере образования двух типов энергетических сообществ, построенных применительно к реальным удаленным поселениям на побережье Японского моря, которые сочетают типично «жилые» нагрузки с промышленными. Получены результаты тестирования модели «Автономный диспетчер», построенной на основе аппарата двухуровневой оптимизации и алгоритма обучения с подкреплением Монте-Карло по поиску в дереве для оптимального экономического управления режимами работы потенциального энергетического сообщества. На нижнем уровне данной модели решается задача нахождения рыночного равновесия посредством минимизации функции общих эксплуатационных затрат. На верхнем – выбирается стратегия управления, дающая наилучшее распределение прибыли между членами сообщества. Исследовались два сценария объединения и работы микросетей поселков в энергетическом сообществе: промышленного и общественного типа. Проведенные исследования показали, что работа поселков в составе энергетических сообществ любого типа более выгодна (с экономической и экологической точек зрения), чем в индивидуальном режиме. Установлено, что при объединении поселков в энергетическое сообщество промышленного типа происходит более существенное снижение стоимости электроэнергии по показателю LCOE от нормированного значения, чем в аналогичном сообществе общественного типа (с 22 руб./кВтч до 6 руб./кВтч – против 22 руб./кВтч до 9 руб./кВтч). Анализ приведенных характеристик разных типов энергетических сообществ может помочь также и проектировщикам определить возможности, особенности и последствия от агрегации микросетей разного типа в различных территориальных и климатических условиях.

Ключевые слова: энергетическое сообщество, микросеть, возобновляемая энергия, многокритериальный выбор, многоцелевая оптимизация, обучение с подкреплением, нулевая эмиссия выбросов углерода

Финансирование. Исследование выполнено в рамках гранта Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2022-1215) с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (проект № 13. ЦКП.21.0038).

Для цитирования: Попова Е.В., Томин Н.В. Анализ подходов к объединению микросетей в энергетические сообщества // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 330–345. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-330-345>. EDN: LKUBQW.

POWER ENGINEERING

Original article

Analysis of approaches to integrating microgrids into energy communities

Ekaterina V. Popova^{1✉}, Nikita V. Tomin²^{1,2}Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. In this article, we set out to identify and analyze the key features of aggregating microgrids into energy communities, with a focus on the predominance of industrial or residential loads. Research methods included a literature review and meta-analysis in the field of planning, modelling and management of microenergy systems and their communities. In addition, a methodological approach combining multi-criteria decision-making methods and artificial intelligence was used. The efficiency of the approach was demonstrated by the establishment of two types

of energy communities for remote settlements on the Sea of Japan coast, which integrated residential and industrial loads. The “Autonomous Operator” model, which involved a two-level optimization and reinforcement learning algorithm based on Monte Carlo tree search, was tested in order to determine the optimal economic management of operation modes of the potential energy community. At the lower level, the problem of finding market equilibrium was solved by minimizing the function of total operating costs. At the upper level, the management strategy that provides the optimal profit distribution among the community members was selected. Two scenarios of microgrid integration and operation in an energy community were studied: industrial and public types. The research demonstrated that operating settlements as energy communities is a more economically and ecologically advantageous approach than operating them individually. The results indicated that the levelized cost of electricity (LCOE) decreased more significantly when combining settlements in an industrial-type energy community (from 22 rub/kWh to 6 rub/kWh) compared to a public-type community (from 22 rub/kWh to 9 rub/kWh). The analysis of the above characteristics of different types of energy communities can help designers to determine the possibilities, features and consequences of aggregating microgrids of different types under various territorial and climatic conditions.

Keywords: energy community, microgrid, renewable energy, multi-objective selection, multi-objective optimization, reinforcement learning, zero carbon emissions

Funding. The study was carried out under the grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 075-15-2022-1215) using the resources of the “High Temperature Contour” Shared Research Facility (project No. 13.CKP.21.0038).

For citation: Popova E.V., Tomin N.V. Analysis of approaches to integrating microgrids into energy communities. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):330-345. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-330-345>. EDN: LKUBQW.

ВВЕДЕНИЕ

Агрегация конечных потребителей, которые производят, потребляют и обмениваются излишками энергии в пределах одного и того же географического периметра, выражает новый способ использования возобновляемой энергии, представленный энергетическими сообществами (ЭСО). При этом в качестве таких потребителей могут выступать как промышленные, так и «жилые» общественные микросети, которые действуют как единый управляемый объект по отношению к внешней электрической сети. В зависимости от преобладающего типа и характера активных потребителей (промышленные предприятия, жилые дома, фермерские хозяйства и пр.), их объединение в группы микросетей в ЭСО может иметь разные причины и цели [1–24], такие как потребительский спрос в энергетической автономии, снижение высоких тарифов на электроэнергию, повышение отказоустойчивости и надежности энергоснабжения, минимизации выбросов загрязняющих газов в городах, более эффективное использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и пр. Часто эти задачи решаются через создание локального рынка электроэнергии с возможностью торговли электроэнергией как между отдельными микросетями (участниками ЭСО), так и с внешней энергосистемой (рис. 1).

Промышленные и «общественные» ЭСО – два типа энергосообществ, которые возникли в результате растущего интереса к

устойчивым и децентрализованным энергетическим системам [1].

Промышленные ЭСО – это, в первую очередь, группы промышленных «системообразующих» энергообъектов, которые, как правило, работают вместе, чтобы оптимизировать использование энергии и снизить ее воздействие на окружающую среду. Во вторую очередь в их состав могут дополнительно (но не обязательно) входить «жилые» нагрузки населения и небольшие предприятия других категорий, например, сельскохозяйственного назначения. Обычно эти сообщества состоят из объектов одной или разных промышленных и/или коммерческих отраслей и могут совместно использовать энергетические ресурсы и инфраструктуру для повышения эффективности и снижения затрат. Например, группа заводов может совместно использовать ТЭЦ для выработки электроэнергии и тепла или совместно применять ВИЭ для удешевления производства электроэнергии. Общими характеристиками таких ЭСО являются тенденции перехода от традиционных технологий производства энергии к более экологичным и безопасным – с ВИЭ, обязательное использование систем накопления энергии с целью сглаживания прерывистого характера выработки энергии от ВИЭ и удовлетворения повышенных (по сравнению с общественными микросетями) требований по надежности систем энергоснабжения, а также коллективное инвестирование в системы ВИЭ и системы накопителей для со-

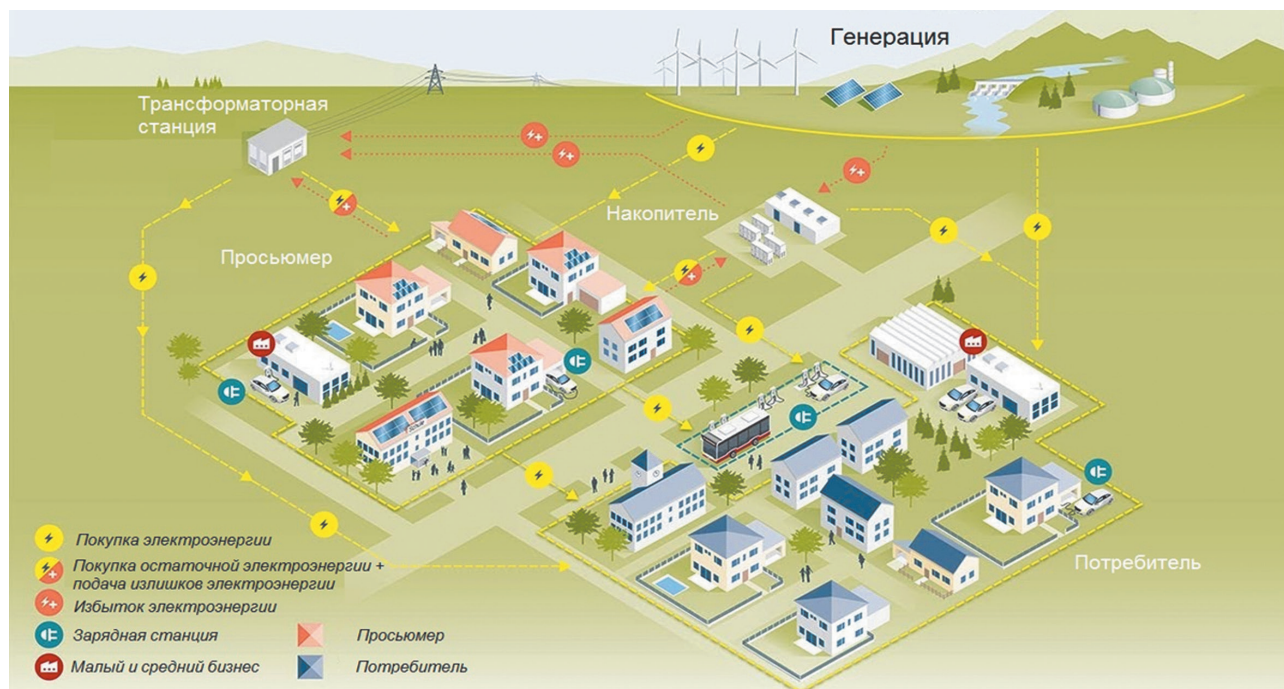


Рис. 1. Пример агрегации двух микросетей в энергетическое сообщество с организацией локального рынка электроэнергии

Fig. 1. An example of two microgrids aggregated into an energy community with the organized local electrical energy market

кращения капитальных и эксплуатационных затрат.

Понятно, что переход от энергии, основанной на ископаемом топливе, к электроэнергии из ВИЭ (к которым относятся в том числе газогенераторные установки – ГГУ) требует масштабных предварительных инвестиций, учитывая значительно более высокие потребности и базовые нагрузки в промышленном секторе, чем в других секторах (например, в застроенной среде). Высокая затратность тормозит продвижение таких проектов как со стороны средних, так и крупных промышленных компаний. Эффективным способом преодоления этого инвестиционного препятствия может явиться коллективное инвестирование в системы ВИЭ и создание так называемой «общественной энергетики» среди компаний промышленного кластера, что поможет сократить затраты почти до 30% [2], а также существенно снизить потери мощности во всей сети.

Другой тип ЭСО, представляющий собой агрегацию общественных микросетей, обычно включает такие «системообразующие» элементы, как группы домохозяйств и/или фермерских хозяйств, а также может дополнительно охватывать «общественные» объекты общественного питания, развлече-

ния и проживания населения, которые работают вместе, чтобы производить и потреблять энергию более устойчивым и эффективным способом. Эти сообщества также организованы вокруг общих ВИЭ (включая ГГУ), а также могут быть (но не обязательно) организованы вокруг общих систем накопления энергии, которые позволяют домохозяйствам «хранить» и оптимально управлять избыточной энергией, например, вырабатываемую солнечными ФЭП на крыше. Работая вместе, домашние и/или фермерские хозяйства в общественном ЭСО могут сократить свои счета за электроэнергию, повысить собственную энергетическую безопасность и уменьшить свой углеродный след. Дополнительными принципами организации и работы таких ЭСО являются принципы социальной справедливости и максимальной сервисной обеспеченности всех слоев населения, поскольку выравнивание графиков генерации и нагрузки здесь зачастую осуществляется за счет создания дополнительных услуг населению.

Понятно, что разграничения между двумя типами ЭСО в некоторой степени условны, поскольку исторически первыми стали «смешанные» ЭСО, включающие элементы общественных и промышленных сообществ.

В основном это ЭСО изолированных территорий (например, Крайнего Севера), не имеющих связи с внешними энергосистемами, где общая генерация и нагрузка состоят из ограниченного числа элементов, имеющих в наличии. Во многих зарубежных странах наибольшую популярность приобрели разнообразные общественные ЭСО, в которых почти все акционеры являются домашними хозяйствами и малыми предприятиями [3]. Правительства этих стран вводят различные механизмы стимулирования развития таких ЭСО. Напротив, в России создана регуляторная база для развития преимущественно промышленных ЭСО. Первым шагом в этом направлении стало появление концепции промышленных микросетей – активных энергетических комплексов (АЭК) в системах внутреннего электроснабжения промышленных предприятий³. Под АЭК в данном случае понимаются коммерческие микросети, связанные с ЕЭС РФ, в состав которых входит не участвующая в оптовом рынке генерация мощностью до 25 МВт, и не входит жилая нагрузка населения. К настоящему времени уже созданы и работают промышленные и коммунальные локальные интеллектуальные энергосистемы (пока только на уровне микросетей): ПАО «Сургутнефтегаз»; «Нижнетагильский металлургический комбинат»; АЭК в г. Тихвин; Мини-ТЭЦ «Березовая» 10 МВт в г. Новосибирск; Мини-ТЭЦ «Сфера» 7,2 МВт в г. Южно-Сахалинск [25]. При этом важно отметить, что индивидуальной концепции построения различных видов ЭСО в РФ пока еще нет. Но наработанный зарубежный опыт применим и в России. А вовлечение частных инвесторов в развитие распределенной энергетики формирует в РФ сферу малого энергетического бизнеса, конкурирующего с традиционным крупным, а также содействует развитию конкуренции и повышению эффективности деятельности этого бизнеса [23, 24].

Основная структура излагаемой статьи включает описание причин и целей объединения различных типов микросетей в группы в рамках ЭСО, оценку ключевых особенностей создания и функционирования ЭСО промышленных и общественных микросе-

тей с жилыми нагрузками. В работе также представлен простой экспериментальный пример создания и функционирования ЭСО с разными категориями потребителей, цели которых достигаются за счет применения методов многокритериального принятия решений и искусственного интеллекта.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООБЩЕСТВ

В общем случае ЭСО технически представляет собой группу микросетей или объектов, которые имеют электрическую связь друг с другом и действуют как единый управляемый объект по отношению к внешней электрической сети. ЭСО может подключаться к внешней сети, как показано на рис. 2 [1], или не иметь такой связи и работать в изолированном режиме (например, в Арктике). Такое сообщество обычно основано на открытом и добровольном участии, в той или иной степени автономно и эффективно контролируется акционерами или участниками, находящимися в непосредственной территориальной близости от проектов ВИЭ, которые также принадлежат и разрабатываются этими лицами. Под акционерами или участниками здесь понимаются в случае «общественных» ЭСО простые физические лица, малые предприятия и местные органы власти (включая муниципалитеты). В случае промышленных ЭСО это, как правило, нанятые профессиональные юристы и экономисты.

Следует отметить, что разделение между промышленными и общественными ЭСО возникло в Российской и зарубежной литературе в последние 2–3 года, и к настоящему времени нет их четко определенных понятий и разграничений между ними. Анализ литературных источников на эту тему показывает, что разработано немало классификаций ЭСО (например, таких как в [25]), но наиболее оправданной, с точки зрения авторов предлагаемой работы, является классификация, согласно которой название и назначение сообществ определяется, главным образом, типом основных «системообразующих» потребителей, которые также являются и совладельцами ВИЭ, и соуправленцами ЭСО, и

³Active energy complexes are the first step towards industrial microgrids in Russia. 2020. Режим доступа: <https://energynet.ru/tpost/2lz89pszd1-active-energy-complexes-are-the-first-st> (дата обращения: 17.02.2024).

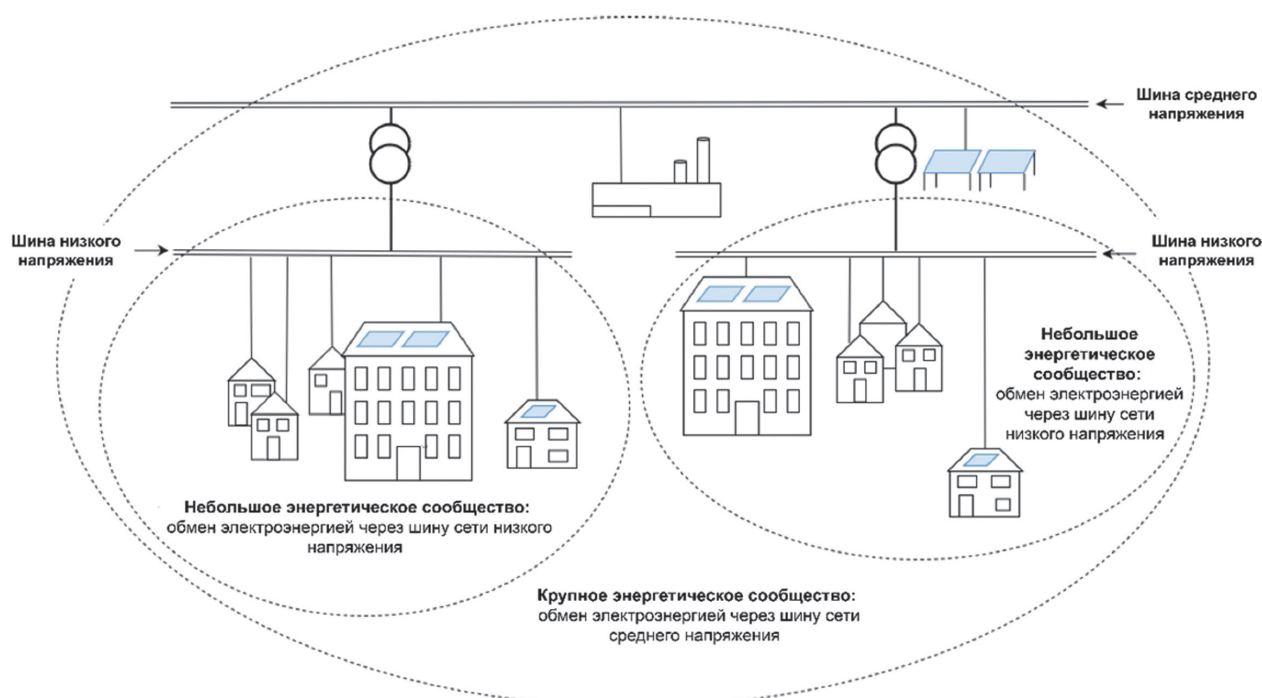


Рис. 2. Пример энергетического сообщества с возобновляемым источником энергии, имеющим связь с внешней энергосистемой через шину среднего напряжения

Fig. 2. An example of an energy community with a renewable energy source connected to an external power grid via a medium voltage bus

инициаторами их создания. (Это принцип так называемой «революции снизу вверх» в действии.) Поэтому группа со-организующихся промышленных объектов обычно составляет промышленное ЭСО, группа объектов, имеющих отношение к населению и обществу – общественное ЭСО. ЭСО изолированных и удаленных территорий зачастую являются промежуточным (смешанным) вариантом.

Ярким примером успешного проекта «смешанных» ЭСО является немецкая деревня Фельдхайм, где удалось добиться фактически полной энергоавтономии и самых низких тарифов на электроэнергию в Германии. Участники сообщества изначально преследовали сразу несколько целей: энергетическая автономия, снижение тарифа и минимизация выбросов загрязняющих газов [19]. И достигли их. Большая часть электроэнергии в Фельдхайме вырабатывается ветроэнергетическими установками и солнечной электростанцией. В случае нехватки энергии от ВИЭ в ход идет биогазовая установка, вырабатывающая до 500 кВт электроэнергии и 500 кВт тепловой энергии, сырьем для которой служат отходы фермерского хозяйства: коровий и свиной навоз, отходы от кукурузы и пшеницы. Также в сообществе предусмо-

трена резервная газогенераторная электростанция, которая применяет древесные отходы местного лесного хозяйства. Используется интеллектуальная система управления распределенными источниками энергии. В данном случае, если фермерские объекты скотный двор и посевы зерновых являются «системообразующими» (а также инициаторами создания ЭСО, соуправленцами и совладельцами ВИЭ), то сообщество объектов можно квалифицировать как общественное ЭСО. Если «системообразующим» является предприятие деревообрабатывающей отрасли, то ЭСО – промышленное.

Существует значительный объем литературных источников по коллективному производству электроэнергии из ВИЭ в разнообразных локальных ЭСО домохозяйств, фермерских хозяйств и малых предприятий, которые по основному признаку (типу «системообразующих» нагрузок) также ближе к смешанному типу. Многие из этих оригинальных сообществ организуются и управляются членами-совладельцами, которые разделяют «оригинальные» ценности, например, связанные с конкретной пространственной территорией, или имеют общие экологические принципы или социальные атрибуты.

Они, как правило, участвуют в коллективных инвестициях – организуют «энергетические кооперативы» и, следовательно, пользуются определенными материальными преимуществами в этих кооперативах и ЭСО [5–7].

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООБЩЕСТВА С ЖИЛЫМИ НАГРУЗКАМИ

Чтобы осуществить промышленный переход на ВИЭ, промышленные предприятия могут рассмотреть возможность инвестирования в генерацию ВИЭ и инфраструктуру по отдельности, что будет осложнено высокими первоначальными инвестиционными затратами. Альтернативным решением является коллективное инвестирование, которое позволяет разделить затраты между участниками, а также административные усилия (например, получение разрешений на строительство электростанции на ВИЭ). Поэтому, несмотря на трудности, связанные с коллективным принятием решений и механизмами координации решений, такой подход является экономически и идеологически выгодным для ЭСО.

Примером такой выгоды является ЭСО с совместным инвестированием в промышленной зоне Беневенто на юге Италии [18], где промышленные «системообразующие»

нагрузки (завод по очистке промышленных сточных вод и многофункциональное здание) дополняются «жилыми» нагрузками сотрудников. Исследование работы созданного ЭСО показало, что совместное использование энергии ВИЭ разными категориями потребителей увеличивает собственное потребление энергии и самодостаточность потребителей. При этом ежегодные выбросы углекислого газа снижаются на 84 т, а эксплуатационные расходы – на 101 тыс. евро. В противоположность большинству позитивных оценок исследование [21] показало, что использование ВИЭ ветроэнергетических установок (ВЭУ) и ГГУ на биомассе нецелесообразны для агрогородка в Индонезии, сочетающего промышленные и «жилые» нагрузки, поскольку скорость подачи энергоресурсов от ВИЭ здесь не соответствует минимальным требованиям для работы технологий ГГУ и ВЭУ. При этом приемлемым вариантом является централизованная система энергоснабжения и резервные дизельные генераторы.

Идея сотрудничества между промышленными компаниями не нова. Существуют многочисленные исследования о «промышленном симбиозе» – типе сотрудничества, при котором промышленные компании обмениваются как ресурсами, так и побочны-



Рис. 3. Пример промышленного энергетического сообщества в г. Вайц (Австрия)

Fig. 3. An example of an industrial energy community in the town of Weitz, Austria

ми продуктами производства [8]. Сотрудничество в этом случае помогает оптимизировать потребление ресурсов, а также получение экономических и экологических выгод для всех участников [9]. Зачастую к такому сотрудничеству, в первую очередь ориентированному на совместное производство электроэнергии и управление спросом, предъявляются дополнительные требования, например, «доверие» [10], «экономические выгоды» [11] или «дух сообщества» [12], которые кажутся в равной степени актуальными. В то же время физико-технические требования, например, географическая близость объектов, которая обычно является ключевым элементом сотрудничества [13], могут оказаться менее существенными в этих энергосообществах в связи с тем, что электроэнергия в них передается от коллективной электростанции к предприятиям через уже существующую электросеть.

ОБЩЕСТВЕННЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООБЩЕСТВА

Для общественных ЭСО наиболее приемлемым является коллективное инвестирование самих жителей в проекты ВИЭ и инфраструктуру. Наиболее передовые и креативные практики построения этих ЭСО возникли на территориях Великобритании, Нидерландов, США и Австралии. В России такие проекты пока не реализованы и не разработаны. Отличительная черта таких ЭСО – более активное совместное использование активов местной энергетики, которое может быть организовано множеством путей – от кооперативной собственности на активы до создания локальных рынков. Так, свой проект управления гибкостью в ЭСО Великобритании начал работу в г. Бетесда, где реализована схема коллективных инвестиций жителей в строительство ГЭС небольшой мощности, а также действует модель мотивации жителей к тому, чтобы потреблять электроэнергию в первую очередь от этой ГЭС в те часы, когда ее выработка максимальна, а цена на электроэнергию минимальна⁴.

Свои особенности также имеют ЭСО Нидерландов. Согласно требованиям, создаваемые микрогриды таких сообществ должны

быть частью архитектуры городов и населенных пунктов. Причем особенность создаваемых «городских» микрогридов заключается в том, что они имеют в своем составе широчайший набор разнообразных элементов как нагрузки, так и альтернативной генерации, продуктивная работа которых невозможна без интеллектуальных систем управления. При этом «городские» ЭСО могут не иметь в своем составе накопители энергии, поскольку стремятся выравнять графики генерации и нагрузки за счет высокой синергии широчайшего набора разнообразных элементов нагрузки и альтернативной генерации (например, кафе и зарядные станции электромобилей). Эффективная работа таких ЭСО невозможна без интеллектуальных систем управления. Поэтому энергокомпания Spectral и Metabolic по заданию правительства Нидерландов разработали и исследовали ряд сценариев работы таких ЭСО, работающих под управлением интеллектуальных систем управления SIDE и SmartHoods [15, 16]. Было разработано девять сценариев работы новаторских ЭСО с различным составом генерации и нагрузок: для коммуны De Ceuve, состоящей из старых барж, поднятых на сушу; плавающей застройки Schoonschip; бывшей промзоны на окраине Амстердама – Republica Paraverweg и экопоселка Aardehuizen – «Земные корабли», показанного на рис. 4.

Напротив, главная задача американского рынка сообществ микрогридов заключается в обеспечении надежности электроснабжения в случае природных стихийных бедствий, а также в создании экологичной альтернативы для резервных дизельных генераторов, используемых при отключении основного электроснабжения. Так, в целях предотвращения длительных отключений во время лесных пожаров были созданы микрогриды в городах Голета, Калистога и в районе Монтесито в Санта-Барбаре⁵. Сообщества этих микрогридов создавались посредством совместных инвестиций жителей, особенно заинтересованных в обеспечении надежности электроснабжения, поскольку их города питаются от энергосистемы по длинным линиям, которые проходят по труднодоступной

⁴Bethesda energy club shares hydro power in UK first // BBC. 2016. Режим доступа: <https://www.bbc.com/news/uk-wales-38236414> (дата обращения: 19.02.2024).

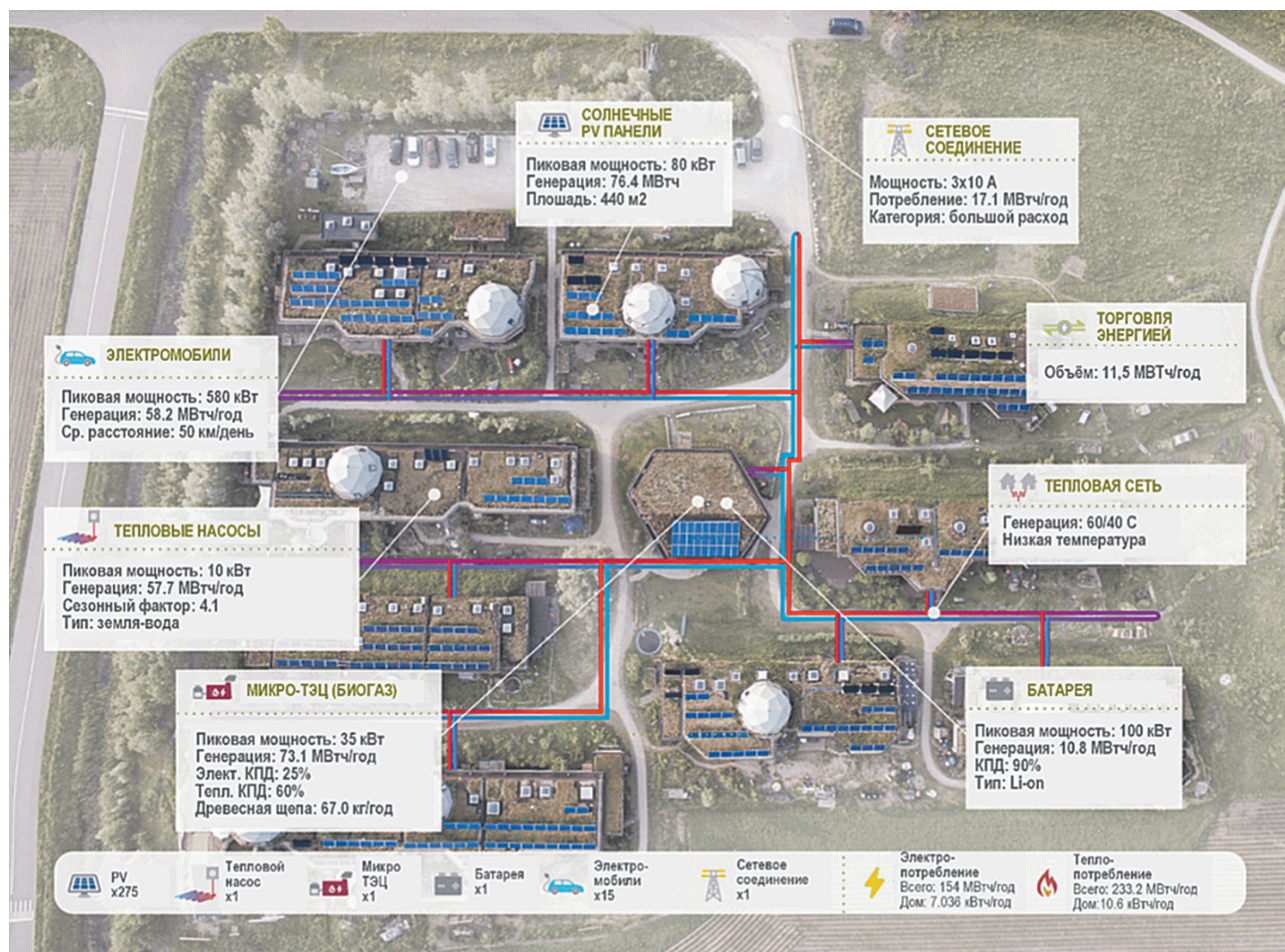


Рис. 4. Пример «общественного» энергетического сообщества «Земные корабли». Адаптировано из [26]

Fig. 4. An example of the “public” energy community “Earth ships”. Adapted from [26]

лесистой или горной местности, и риск аварий на которых в период лесных пожаров особенно велик, а потому они первыми попадают под превентивное отключение.

КЛЮЧЕВЫЕ ОСОБЕННОСТИ АГРЕГАЦИИ МИКРОСЕТЕЙ В РАЗНЫЕ ТИПЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СООБЩЕСТВА

На основании вышеизложенного анализа можно выделить несколько ключевых особенностей создания и функционирования промышленных и «общественных» ЭСО с жилыми нагрузками:

1. Масштаб: промышленные ЭСО, как правило, крупнее (масштабнее), чем «общественные» ЭСО, поскольку они включают несколько промышленных объектов, работающих вместе, для оптимизации их энергопотребления. «Общественные» ЭСО, как

правило, менее масштабные и включают домохозяйства или фермерские хозяйства, работающие вместе для производства и потребления энергии.

2. Источники энергии: промышленные ЭСО часто полагаются на традиционные источники энергии, такие как природный газ, уголь или нефть, а также крупные ВИЭ, такие как ветрогенераторы и солнечные панели. В противоположность небольшие «общественные» ЭСО в первую очередь будут полагаться на газогенераторы, работающие на попутном газе, полученном от переработки древесины, продукции сельского хозяйства, теплиц, мусорных полигонов и т.д., т.е. сопутствующих предприятий сельхозназначения, входящих в состав этих ЭСО; а во вторую очередь – на солнечные панели небольшой мощности на крышах строений. И только крупные богатые

⁵Energy Central. Achieving resilience through renewables-driven Community Microgrids. Режим доступа: <https://energycentral.com/c/ec/achieving-resilience-through-renewables-driven-community-microgrids> (дата обращения: 17.02.2024).

«общественные» ЭСО предпочитают вкладывать деньги в строительство ветрогенераторов на паевых условиях.

3. Инфраструктура: Промышленным ЭСО часто требуется значительная инфраструктура для совместного использования энергетических ресурсов и оптимизации использования энергии, например, общие ТЭЦ или ВИЭ. «Общественным» ЭСО может потребоваться меньше инфраструктуры, но тем не менее необходимо координировать производство и накопление энергии между домохозяйствами.

4. Собственность и управление: промышленные ЭСО могут принадлежать и профессионально управляться одним юридическим лицом, например, коммунальным предприятием или группой промышленных объектов. «Общественные» ЭСО часто принадлежат самим домохозяйствам и коллективно управляются ими, что может создавать проблемы в отношении управления и принятия решений.

5. Экономические модели: промышленные ЭСО могут действовать в соответствии с различными экономическими моделями, такими как соглашения о покупке электроэнергии или соглашения о совместных сбережениях. «Общественные» ЭСО могут работать по модели кооператива или общественной собственности.

6. Способы выравнивания графиков нагрузки и генерации в основном определяются требованиями по надежности энергоснабжения потребителей, которые для промышленных предприятий, входящих в состав промышленных ЭСО выше, чем для других категорий потребителей. Поэтому в этих ЭСО, а также во всех ЭСО изолированных территорий неравномерность графиков генерации и нагрузки компенсируется с помощью накопителей разного типа. В чисто «городских» ЭСО проблему зачастую решают путем «набора» дополнительных компонентов генерации и нагрузки, попутно решая проблемы рабочих мест, социального развития территорий и сервисной обеспеченности населения.

Дополнительно к особенностям каждого типа ЭСО имеет смысл рассмотреть также их общие характеристики, которые заключаются в следующем [20]. При проектировании ЭСО следует учитывать географические особенности региона расположения, поскольку

они определяют либо наличие связи ЭСО с внешней энергосистемой, либо его автономность; ветро- и гелиоэнергетический потенциал определяют эффективность основных элементов генерации, таких как ФЭП и ВЭУ; сопутствующие производства повышают процент загрузки микросети, а также могут являться источником биомассы для ГГУ (например, лесное хозяйство является источником щепы для печей на пеллетах в жилых поселениях).

Анализ рассмотренных характеристик может помочь определить возможности и проблемы, связанные с промышленными и «общественными» ЭСО, и принять обоснованные решения относительно их проектирования, реализации и эксплуатации. Поэтому для решения проблемы учета множества факторов, усложняющих создание и эксплуатацию ЭСО (экономических, климатических, экологических), в [22] авторами излагаемой статьи предложен единый многокритериальный подход к созданию и управлению ЭСО с ВИЭ. Эффективность подхода продемонстрирована на примере двух типов ЭСО, состоящих из удаленных поселений на побережье Японского моря, которые сочетают типично «жилые» нагрузки с промышленными (рыбный консервный завод).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим пример изолированного ЭСО, состоящего из трех поселков (микросетей), расположенных в непосредственной близости друг от друга и сильно удаленных от централизованной электрической системы (рис. 5). Поселки имеют собственные распределенные источники энергии: дизельные генераторы (ДЭС), газогенераторы (ГГЭС), ФЭП и ветростанции (ВЭС). Также для компенсации прерывистой генерации ВИЭ во всех поселках установлены аккумуляторные батареи (АКБ). Данный пример адаптирован к реальной ситуации Приморского края, где в настоящее время энергоснабжение осуществляется от ДЭС, имеющих высокий физический износ, и необходимо рассмотреть варианты дальнейшего энергоснабжения поселков.

Исследуем два сценария объединения микросетей поселков в ЭСО, что позволит оценить преимущества от формирования промышленного и общественного сообществ:

1. Промышленный сценарий, когда Поселки 1 и 3 имеют чисто промышленную нагрузку: трехсменное и односменное предприятия, при этом Поселок 2 включает чисто жилую бытовую нагрузку (рис. 6).

2. Общественный сценарий, когда Поселки 1 и 3 уже имеют «смешанные» нагрузки, т.е. бытовую и промышленную, при этом доля последней невелика. Инициаторами и соуправленцами ЭСО являются жильцы поселков.

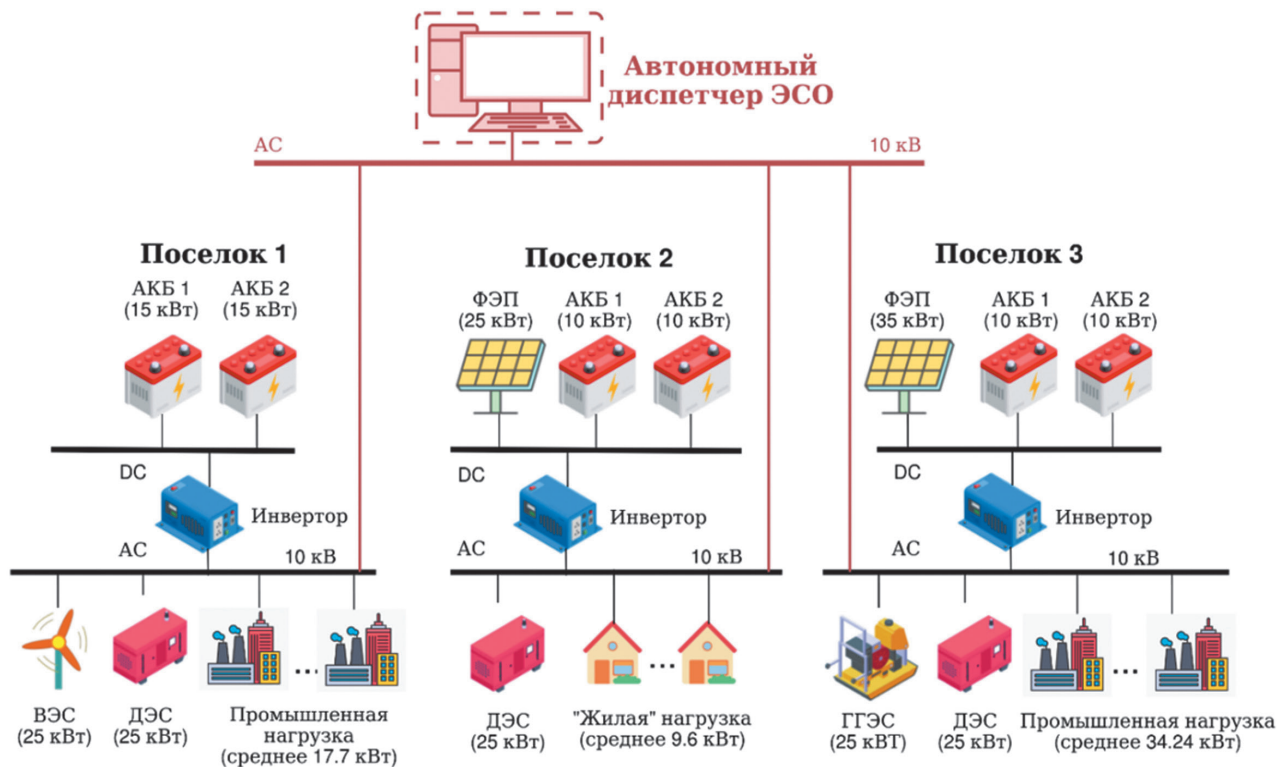


Рис. 5. Общая схема рассматриваемого энергетического сообщества, которое включает три микросети поселков для исходного промышленного сценария

Fig. 5. A general scheme of the studied energy community, which includes three micro-networks of settlements for the initial industrial scenario

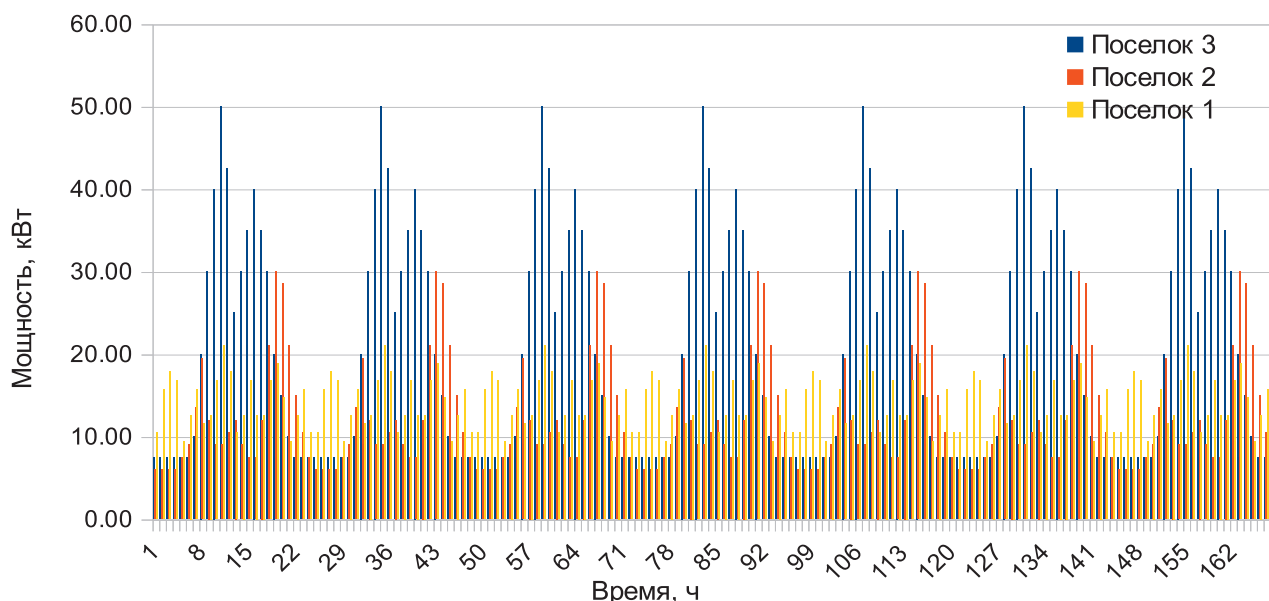


Рис. 6. График недельного энергопотребления микросетей рассматриваемых поселков для исходного промышленного сценария

Fig. 6. The graph of the weekly energy consumption of microgrids of the settlements under consideration for the initial industrial scenario

Предполагается, что ЭСО оптимально управляются программным обеспечением «Автономный диспетчер», модель которого излагалась ранее в [22, 26]. «Автономный диспетчер» использует аппарат двухуровневой оптимизации и машинного обучения, применяет алгоритм Монте-Карло по поиску в дереве, чтобы автоматически перераспределять доходы и расходы между участниками ЭСО.

На нижнем уровне решается задача нахождения рыночного равновесия для определения оптимальных объемов обмена мощностью между микросетями поселков, цены и пиковой мощности в ЭСО. При этом минимизируется функция общих эксплуатационных затрат, в которой учитываются технические, экономические и экологические критерии. На верхнем уровне реализуется принцип социальной справедливости, когда из множества возможных стратегий выбирается та, которая, согласно условию эффективности по Парето, дает справедливое распределение прибылей между членами сообщества. Для этого решается задача оптимизации – рассчитывается максимальная прибыль каждой микросети $J_{u,opt}^{SU}$, которую она могла бы получить, не вступая в ЭСО, и сравнивается по выражению (1) с прибылью каждой микросети $J_{u,opt}$ в составе ЭСО:

$$J_{u,opt} \geq J_{u,opt}^{SU} + \alpha, \quad (1)$$

где $J_{u,opt} = J_{u,opt}^{energy} + J_u^{peak}$ – общая прибыль микросети u в составе ЭСО; $\alpha \geq 0$ – резервная переменная, которую нужно максимизировать. Важно заметить, что максимизация α соответствует максимизации условия $\min(J_{u,opt} - J_{u,opt}^{SU})$, т.е. минимального увеличения прибыли, достигнутого всеми участниками ЭСО. При этом если хотя бы одно неравенство в (1) выполня-

ется строго, то состояние ЭСО называется парето-превосходным по сравнению с состоянием, когда микросети действуют индивидуально.

Результаты моделирования функционирования микросетей поселков в рамках рассматриваемых сценариев представлены в табл. 1, где выполнена оценка эффективности управления режимами микросетей поселков как при их изолированной работе (автономной друг от друга), так и в составе ЭСО.

Из табл. 1 видно, что во всех случаях и сценариях работа поселков в составе ЭСО приносит большую прибыль, чем в индивидуальном режиме, т.е. работа в составе ЭСО более выгодна с экономической точки зрения (согласно формуле (1)). Этот факт способствует долгосрочной агрегации участников ЭСО. Также видно, что промышленный сценарий формирования и функционирования ЭСО влечет за собой большие затраты для Поселков 1 и 2 в сравнении с общественным сценарием. В Поселке 3 – наоборот. В целом такое положение дел ожидаемо, так как повышенная промышленная нагрузка подразумевает большие эксплуатационные затраты на ее покрытие.

Далее, сравнивались два сценария работы ЭСО по показателю $LCOE$ – нормированной стоимости электроэнергии. Результаты сравнения на примере Поселка 1 показали, что в промышленном сценарии стоимость электроэнергии в течение суток снижается (за счет активного обмена электроэнергией между микросетями) с 22 руб/кВт·ч до 6 руб/кВт·ч, что для промышленных предприятий с их повышенными нагрузками представляется значимым экономическим фактом. В общественном ЭСО стои-

Таблица 1. Сравнение суммарных недельных прибылей микросетей поселков, работающих как изолированно, так и в составе энергетического сообщества

Table 1. Comparison of the accumulated weekly profits of settlement micro-grids operating both in an island mode and as a part of an energy community

Микросети	Суммарные прибыли микросетей, руб.			
	общественный сценарий		промышленный сценарий	
	изолиров., $J_{u,opt}^{SU}$	ЭСО, $J_{u,opt}$	изолиров., $J_{u,opt}^{SU}$	ЭСО, $J_{u,opt}$
Поселок 1	341,96	669,16	-5663,35	-4595,49
Поселок 2	220,00	446,56	-769,22	-676,51
Поселок 3	-6298,45	-5161,29	793,88	1302,33

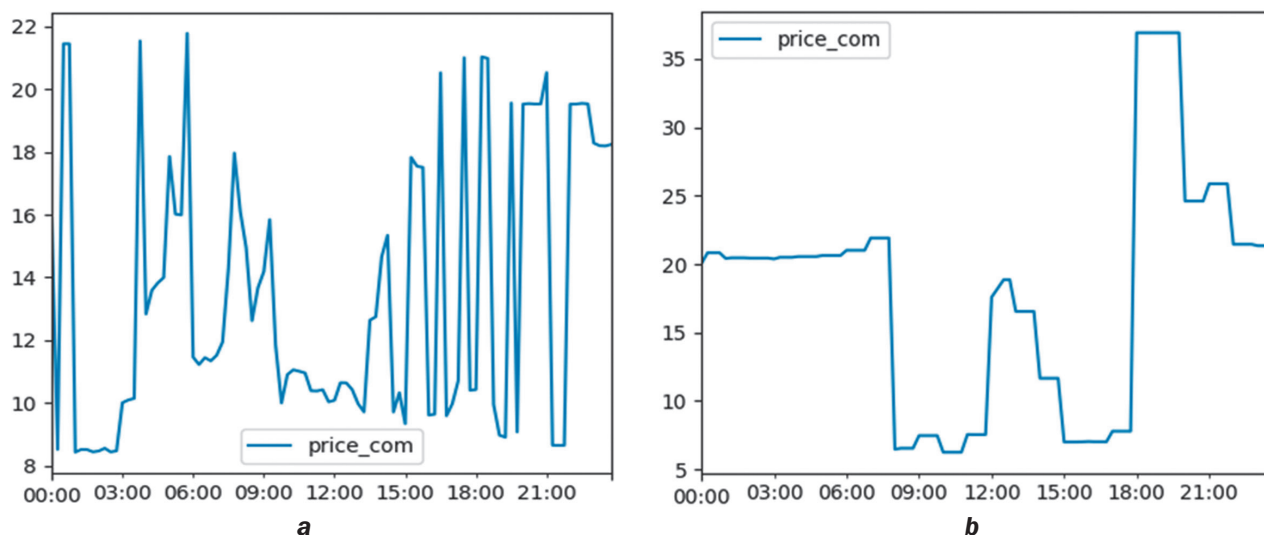


Рис. 7. Графики суточного изменения цены (price_com) на электроэнергию (руб/кВт·ч) в энергетическом сообществе для Поселка 1 для разных сценариев: а – общественный сценарий; б – промышленный сценарий

Fig. 7. Graphs of daily price variation (price_com) for electrical energy (rubles/kWh) in the energy community for the Settlement 1 for different scenarios: а – public scenario; б – industrial scenario

Таблица 2. Накопительные штрафы за выбросы CO₂ в течение недельного тестового моделирования

Table 2. Cumulative penalties for CO₂ emissions during a week-long test simulation

Микросети	Накопительный штраф за выбросы CO ₂ , руб.	
	общественный	промышленный
Поселок 1	4400	2640
Поселок 2	2560	2720
Поселок 3	5440	6000

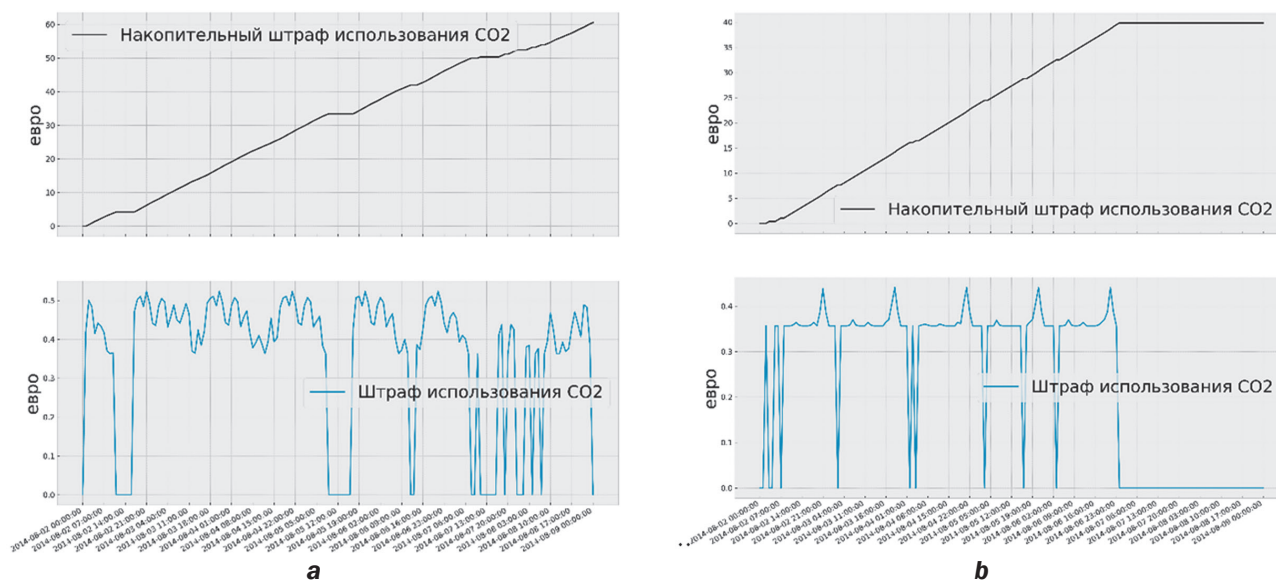


Рис. 8. Штрафы за выбросы CO₂ для Поселка 1 в течение недельного тестового моделирования: а – «общественный» сценарий; б – промышленный сценарий

Fig. 8. Penalties for CO₂ emissions for the Settlement 1 during a week-long test simulation: а – public scenario; б – industrial scenario

мость электроэнергии снижается только до 9 руб/кВт·ч. Также оценивался экологический аспект в рассматриваемых сценариях

ЭСО. В этом случае модель «автономного диспетчера» на нижнем уровне «старалась» минимизировать объем выбросов CO₂,

генерируемых при включении ДЭС. Стоимость этих выбросов принималась равной 0,1 евро/кВт·ч (или 8 руб/кВт·ч). При этом выбросы CO₂, которые может давать само предприятие, в процессе его работы не учитывались.

В табл. 2 показаны накопительные штрафы за выбросы CO₂ в течение недельного тестового моделирования. Из таблицы видно, что в промышленном сценарии выбросы CO₂ при включении ДЭС в Поселках 2, 3 не критично выше, чем в общественном сценарии, а в Поселке 1 – наоборот. В целом показатели сопоставимы во всех случаях.

Стоимость накопительных выбросов CO₂ для «особенного» Поселка 1 в течение недельного тестового моделирования показана на рис. 8. Снижение экологических затрат для промышленного сценария в этом случае, вероятно, связано с большей емкостью систем АКБ (Поселок 1 – 30 кВт·ч, в остальных поселках по 20 кВт·ч). Характер промышленной нагрузки позволяет в большей степени задействовать АКБ и минимизировать использование ДЭС.

Обобщение результатов моделирования двух сценариев работы ЭСО на примере поселков Приморского Края показало, что во всех случаях и сценариях работа всех поселков в составе ЭСО экономически и экологически более выгодна, чем в индивидуальном режиме; при объединении поселков в ЭСО промышленного типа происходит более существенное снижение нормированной стоимости электроэнергии LCOE, чем в ЭСО общественного типа; напротив, выбросы CO₂, обусловленные работой ДЭС, в промышленном ЭСО

почти всегда оказываются не критично выше, чем в общественном ЭСО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ рассмотренных общих и индивидуальных характеристик разных типов энергосообществ может помочь определить возможности и проблемы, связанные с промышленными и «общественными» ЭСО и принять обоснованные решения относительно их проектирования, реализации и эксплуатации. При этом к настоящему времени нет четкого разграничения между понятиями промышленного и общественного ЭСО. В большинстве случаев они представляют собой некий смешанный тип – симбиоз, что наиболее характерно для потенциальных ЭСО удаленных и изолированных территорий (например, Крайнего Севера и Якутии), где другие варианты невозможны. При сравнении преимуществ от работы потребителей в составе микросетей определенного типа и в сообществе микросетей выявляется несомненное преимущество ЭСО смешанного типа за счет высокой синергии широкого спектра элементов генерации и нагрузки, а также накопителей энергии разного типа. Наиболее оправданной с экономической и технической точек зрения, по мнению авторов работы, является классификация ЭСО в соответствии с типом «системообразующих» нагрузок, которые являются соинвесторами, соуправленцами, а также инициаторами создания ЭСО.

Важно также отметить, что индивидуальной концепции построения различных видов ЭСО в РФ пока еще нет. Но наработанный и адаптированный зарубежный опыт применим и в России.

Список источников

1. Warneryd M., Håkansson M., Karltorp K. Unpacking the complexity of community microgrids: a review of institutions' roles for development of microgrids // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 121. P. 109690. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109690>.
2. Dhahi A. Renewable power generation costs in 2017 // IRENA. International Renewable Energy Agency. Режим доступа: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jan/IRENA_2017_Power_Costs_2018.pdf (дата обращения: 17.02.2024).
3. Abolhosseini S., Heshmati A. The main support mechanisms to finance renewable energy development // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 40. P. 876–885. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.013>.
4. Дацко К.А. Активные энергокомплексы // *Энергетическая политика*. 2020. № 6. С. 64–75. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_6148_64. EDN: KEVGJS.
5. Magnani N., Osti G. Does civil society matter? Challenges and strategies of grassroots initiatives in Italy's energy transition // *Energy Research & Social Science*. 2016. Vol. 13. P. 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.012>.

6. Gjorgievski V.Z., Cundeva S., Georghiou G.E. Social arrangements, technical designs and impacts of energy communities: a review // *Renewable Energy*. 2021. Vol. 169. P. 1138–1156. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.078>.
7. Bomberg E., McEwen N. Mobilizing community energy // *Energy Policy*. 2012. Vol. 51. P. 435–444. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2012.08.045>.
8. Domenech T., Davies M. Structure and morphology of industrial symbiosis networks: the case of Kalundborg // *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2011. Vol. 10. P. 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.01.011>.
9. Lombardi D.R., Laybourn P. Redefining industrial symbiosis: crossing academic-practitioner boundaries // *Journal of Industrial Ecology*. 2012. Vol. 16. Iss. 1. P. 28–37. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00444.x>.
10. Deutz P., Lyons D.L., Gibbs D., Jackson T. Industrial ecology and regional development, progress in industrial ecology // *International Journal*. 2007. Vol. 4. Iss. 3-4. P. 155–163.
11. Walls J.L., Paquin R.L. Organizational perspectives of industrial symbiosis: a review and synthesis // *Organization and Environment*. 2015. Vol. 28. Iss. 1. P. 32–53. <https://doi.org/10.1177/1086026615575333>.
12. Golev A., Corder G.D., Giurco D.P. Barriers to industrial symbiosis: insights from the use of a maturity grid // *Journal of Industrial Ecology*. 2015. Vol. 19. Iss. 1. P. 141–153. <https://doi.org/10.1111/jiec.12159>.
13. Jensen P.D., Basson L., Hellawell E.E., Bailey M.R., Leach M. Quantifying “geographic proximity”: Experiences from the United Kingdom’s national industrial symbiosis programme // *Resources Conservation and Recycling*. 2011. Vol. 55. Iss. 7. P. 703–712. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.02.003>.
14. Томин Н.В., Шакиров В.А., Курбацкий В.Г., Попова Е.В., Сидоров Д.Н., Козлов А.В. [и др.]. Энергетические сообщества с возобновляемыми источниками энергии: эффективное планирование и управление в условиях многокритериальности. Часть 1 // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2023. Т. 3. № 78. С. 18–27. EDN: WTRODK.
15. De Graaf F., Goddek S. Smarthoods: aquaponics integrated microgrids // *Aquaponics Food Production Systems* / eds. S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, G.M. Burnell. Cham: Springer, 2019. P. 321–338. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_15.
16. Homan B., Hoogsteen G., Nebiolo S., Hurink J.L., Smit G.J.M. Maximizing the degree of autarky of a 16 house neighbourhood by locally produced energy and smart control // *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2019. Vol. 20. P. 100270. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100270>.
17. Muttaqee M., Furqan M., Boudet H. Community response to microgrid development: case studies from the U.S. // *Energy Policy*. 2023. Vol. 181. P. 113690. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113690>.
18. Ceglia F., Marrasso E., Martone C., Pallotta G., Roselli C., Sasso M. Towards the decarbonization of industrial districts through renewable energy communities: techno-economic feasibility of an Italian case study // *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 6. P. 2722. <https://doi.org/10.3390/en16062722>.
19. Adu-Kankam K.O., Camarinha-Matos L.M. Renewable energy communities or ecosystems: an analysis of selected cases // *Heliyon*. 2022. Vol. 8. Iss. 12. P. e12617. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12617>.
20. Yang Weijia, Sparrow S.N., Ashtine M., Wallom D.C.H., Morstyn T. Resilient by design: preventing wildfires and blackouts with microgrids // *Applied Energy*. 2022. Vol. 313. P. 118793. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118793>.
21. Pandyaswargo A.H., Wibowo A.D., Onoda H. Socio-techno-economic assessment to design an appropriate renewable energy system for remote agricultural communities in developing countries // *Sustainable Production and Consumption*. 2022. Vol. 31. P. 492–511. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.03.009>.
22. Tomin N., Shakirov V., Kurbatsky V., Muzychuk R., Popova E., Sidorov D. et al. A multi-criteria approach to designing and managing a renewable energy community // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 199. P. 1153–1175. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.151>.
23. Gjorgievski V.Z., Cundeva S., Georghiou G.E. Social arrangements, technical designs and impacts of energy communities: a review // *Renewable Energy*. 2021. Vol. 169. P. 1138–1156. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.078>.
24. Бык Ф.Л., Васильев В.Г., Карпунин В.А., Мышкина Л.С. Функции региональных сетевых компаний при интеграции локальных энергосистем // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2020. № 2. С. 48–55. EDN: DQMPRC.
25. Илюшин П.В. Перспективные направления развития распределительных сетей при интеграции локальных интеллектуальных энергосистем // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2021. № 4. С. 70–80. EDN: JVMAIL.
26. Sepa J. The microgrid case studies: community resilience for natural disasters. 2020. Режим доступа: <https://sepower.org/resource/the-microgrid-case-studies-community-resilience-for-natural-disasters> (дата обращения: 18.02.2024).

References

1. Warneryd M., Håkansson M., Karltorp K. Unpacking the complexity of community microgrids: a review of institutions’ roles for development of microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020;121:109690. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109690>.

2. Dhahi A. Renewable power generation costs in 2017. IRENA. International Renewable Energy Agency. Available from: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jan/IRENA_2017_Power_Costs_2018.pdf [Accessed 17th February 2024].
3. Abolhosseini S., Heshmati A. The main support mechanisms to finance renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;40:876-885. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.013>.
4. Datsko K.A. Active energy complexes. *Energy policy*. 2020;6:64-75. (In Russ.). https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_6148_64. EDN: KEVGJS.
5. Magnani N., Osti G. Does civil society matter? Challenges and strategies of grassroots initiatives in Italy's energy transition. *Energy Research & Social Science*. 2016;13:148-157. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.012>.
6. Gjorgievski V.Z., Cundeva S., Georghiou G.E. Social arrangements, technical designs and impacts of energy communities: a review. *Renewable Energy*. 2021;169:1138-1156. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.078>.
7. Bomberg E., McEwen N. Mobilizing community energy. *Energy Policy*. 2012;51:435-444. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2012.08.045>.
8. Domenech T., Davies M. Structure and morphology of industrial symbiosis networks: the case of Kalundborg. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2011;10:79-89. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.01.011>.
9. Lombardi D.R., Laybourn P. Redefining industrial symbiosis: crossing academic-practitioner boundaries. *Journal of Industrial Ecology*. 2012;16(1):28-37. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00444.x>.
10. Deutz P., Lyons D.L., Gibbs D., Jackson T. Industrial ecology and regional development, progress in industrial ecology. *International Journal*. 2007;4(3-4):155-163.
11. Walls J.L., Paquin R.L. Organizational perspectives of industrial symbiosis: a review and synthesis. *Organization and Environment*. 2015;28(1):32-53. <https://doi.org/10.1177/1086026615575333>.
12. Golev A., Corder G.D., Giurco D.P. Barriers to industrial symbiosis: insights from the use of a maturity grid. *Journal of Industrial Ecology*. 2015;19(1):141-153. <https://doi.org/10.1111/jiec.12159>.
13. Jensen P.D., Basson L., Hellawell E.E., Bailey M.R., Leach M. Quantifying “geographic proximity”: Experiences from the United Kingdom's national industrial symbiosis programme. *Resources Conservation and Recycling*. 2011;55(7):703-712. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.02.003>.
14. Tomin N.V., Shakirov V.A., Kurbackij V.G., Popova E.V., Sidorov D.N., Kozlov A.V., et al. Renewable energy communities: effective design and management under multicriteria conditions. Part 1. *Electric Power. Transmission and distribution*. 2023;3(78):18-27. (In Russ.). EDN: WTRODK.
15. De Graaf F., Goddek S. Smarthoods: aquaponics integrated microgrids. In: Goddek S., Joyce A., Kotzen B., Burnell G.M. (eds.). *Aquaponics Food Production Systems*. Cham: Springer; 2019, p. 321-338. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_15.
16. Homan B., Hoogsteen G., Nebiolo S., Hurink J.L., Smit G.J.M. Maximizing the degree of autarky of a 16 house neighbourhood by locally produced energy and smart control. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2019;20:100270. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100270>.
17. Muttaqee M., Furqan M., Boudet H. Community response to microgrid development: case studies from the U.S. *Energy Policy*. 2023;181:113690. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113690>.
18. Ceglia F., Marrasso E., Martone C., Pallotta G., Roselli C., Sasso M. Towards the decarbonization of industrial districts through renewable energy communities: techno-economic feasibility of an Italian case study. *Energies*. 2023;16(6):2722. <https://doi.org/10.3390/en16062722>.
19. Adu-Kankam K.O., Camarinha-Matos L.M. Renewable energy communities or ecosystems: an analysis of selected cases. *Heliyon*. 2022;8(12):e12617. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12617>.
20. Yang Weijia, Sparrow S.N., Ashtine M., Wallom D.C.H., Morstyn T. Resilient by design: preventing wildfires and blackouts with microgrids. *Applied Energy*. 2022;313:118793. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118793>.
21. Pandeyaswargo A.H., Wibowo A.D., Onoda H. Socio-techno-economic assessment to design an appropriate renewable energy system for remote agricultural communities in developing countries. *Sustainable Production and Consumption*. 2022;31:492-511. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.03.009>.
22. Tomin N., Shakirov V., Kurbaty V., Muzychuk R., Popova E., Sidorov D. et al. A multi-criteria approach to designing and managing a renewable energy community. *Renewable Energy*. 2022;199:1153-1175. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.151>.
23. Gjorgievski V.Z., Cundeva S., Georghiou G.E. Social arrangements, technical designs and impacts of energy communities: a review. *Renewable Energy*. 2021;169:1138-1156. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.078>.
24. Byk F.L., Vasil'ev V.G., Karpuhin V.A., Myshkina L.S. Functions of regional network companies in the integration of local power systems. *Electric Power. Transmission and distribution*. 2020;2:48-55. (In Russ.). EDN: DQMPCR.
25. Ilyushin P.V. Advanced trends of distribution network development when integrating local intelligent power systems. *Electric Power. Transmission and distribution*. 2021;4:70-80. (In Russ.). EDN: JVMAIL.
26. Sepa J. The microgrid case studies: community resilience for natural disasters. 2020. Available from: <https://sepapower.org/resource/the-microgrid-case-studies-community-resilience-for-natural-disasters> [Accessed 18th February 2024].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Попова Екатерина Валерьевна,

к.т.н.,
старший инженер,
Отдел электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
✉ elen@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0009-0001-3971-6968>

Томин Никита Викторович,

к.т.н.,
заведующий лабораторией управления
функционированием электроэнергетических систем
№43,
Отдел электроэнергетических систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия
tomin.nv@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5898-9649>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ekaterina V. Popova,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Engineer,
Department of Electric Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
✉ elen@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0009-0001-3971-6968>

Nikita V. Tomin,

Cand. Sci. (Eng.),
Head of the LaboratoryHead of the Electric Power
System Operation Control Laboratory No. 43,
Department of Electric Power Systems,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia
tomin.nv@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5898-9649>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 18.04.2024 г.; принята к публикации 20.04.2024 г.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 18.03.2024; approved after reviewing 18.04.2024; accepted for publication 20.04.2024.