

## Formation of Energy Supply Systems for Special Economic Zones

Byk F.L., Ivanova E.M., Myshkina L.S.

Novosibirsk State Technical University

Novosibirsk, Russian Federation

**Abstract.** The purpose of the article is to develop the principle of forming integrated energy supply systems that consider the relationship between the production, transmission and consumption of thermal and electrical energy, as well as to develop a methodology for selecting the composition and structure of generating equipment to ensure the affordability and uninterrupted supply of energy. To achieve this purpose, the following tasks were accomplished: the energy supply systems of existing special economic zones were studied, and their shortcomings were identified; the creation of integrated energy supply systems for territories based on cogeneration technologies was proposed; a methodology for selecting the composition and structure of equipment for mini-CHPP (combined heat power plant) integrated energy systems was developed. The most important result is a comprehensive methodology for selecting the composition and structure of mini-CHPP equipment in an integrated energy supply system, ensuring maximum fuel efficiency for energy production and energy efficiency for the energy supply system. Performing calculations based on the developed methodology using the example of the advanced development area «SmartCity-Novosibirsk», we were able to propose the creation of an integrated energy supply system for residents. The significance of these results lies in their potential to improve the efficiency of decision-making processes in the field of energy infrastructure development by considering interconnections between heat and power supply processes and the methodology of selecting mini-CHPP equipment for integrated energy systems.

**Keywords:** special economic zone, priority development area, energy supply system, energy efficiency, accessibility, continuity, distributed energy, cogeneration.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.3-63.05>

UDC: 621.311; 338.49

### Formarea sistemelor de alimentare cu energie pentru zonele economice speciale

Bâc F.L., Ivanova E.M., Mășchina L.S.

Universitatea Tehnică de Stat din Novosibirsk, Novosibirsk, Federația Rusă

**Rezumat.** Scopul lucrării este de a dezvolta principiul formării sistemelor integrate de alimentare cu energie care să ia în considerare relația dintre producția, transportul și consumul de energie termică și electrică, precum și dezvoltarea unei metodologii de selectare a compoziției și structurii echipamentelor de generare pentru a asigura accesibilitatea și furnizarea neîntreruptă de energie. Pentru atingerea acestui scop, au fost îndeplinite următoarele sarcini: au fost studiate sistemele de alimentare cu energie a zonelor economice speciale existente și au fost identificate deficiențele acestora; s-a propus crearea de sisteme integrate de alimentare cu energie pentru teritorii bazate pe tehnologii de cogenerare; a fost elaborată o metodologie de selectare a compoziției și structurii echipamentelor pentru sistemele energetice integrate mini-CET. Cel mai important rezultat este o metodologie cuprinzătoare de selectare a compoziției și structurii echipamentelor mini-CET într-un sistem integrat de alimentare cu energie, asigurând eficiența maximă a combustibilului pentru producția de energie și eficiența energetică pentru sistemul de alimentare cu energie. Efectuând calcule pe baza metodologiei dezvoltate folosind exemplul zonei de dezvoltare avansată „SmartCity-Novosibirsk”, am putut propune crearea unui sistem integrat de alimentare cu energie pentru rezidenți. Rezultatele obținute sunt semnificative în rezolvarea problemelor legate de formarea infrastructurii energetice în teritoriile în care este necesară asigurarea eficienței energetice, accesibilității economice, continuității și ecologice în furnizarea de energie către consumatori. Semnificația acestor rezultate constă în potențialul lor de a îmbunătăți eficiența proceselor de luare a deciziilor în domeniul dezvoltării infrastructurii energetice prin luarea în considerare a interconexiunilor dintre procesele de alimentare cu energie termică și electrică și a metodologiei de selectare a echipamentelor mini-CET pentru sistemele integrate de energie.

**Cuvinte-cheie:** zona economica speciala, zona de dezvoltare prioritara, sistem de alimentare cu energie, eficienta energetica, accesibilitate, continuitate, energie distribuita.

**Формирование систем энергоснабжения особых экономических зон****Бык Ф.Л., Иванова Е.М., Мышкина Л.С.**

Новосибирский государственный технический университет

Новосибирск, Российская Федерация

**Аннотация.** Развитие экономики во многом связано с развитием систем тепло- и электроснабжения, формирующих энергетическую инфраструктуру территорий. Экономическая доступность и бесперебойность электроснабжения важна для резидентов особых экономических зон, определяющих социально-экономического развития стран. При этом применяемые сегодня традиционные решения по формированию систем энергоснабжения зачастую не отвечают указанным требованиям. Целью работы является разработка принципа формирования интегрированных систем энергоснабжения, учитывающих взаимосвязь производства, передачи и потребления тепловой и электрической энергии, а также разработку методики выбора состава и структуры генерирующего оборудования, позволяющей обеспечить доступность и бесперебойности энергоснабжения. Для достижения указанной цели решены следующие задачи: исследованы системы энергоснабжения существующих особых экономических зон и выявлены их недостатки; предложено создание интегрированных систем энергоснабжения территорий на основе когенерационных технологий; разработана методика выбора состава и структуры оборудования мини-ТЭЦ интегрированных систем энергоснабжения. Наиболее важным результатом является комплексная методика выбора состава и структуры оборудования мини-ТЭЦ в интегрированной системе энергоснабжения, обеспечивающая максимальную топливную эффективность производства энергии и энергоэффективность системы энергоснабжения. Выполнение расчетов по разработанной методике на примере территории опережающего развития «СмартСити-Новосибирск» позволило предложить формирование интегрированной системы энергоснабжения. Наиболее важными результатами являются обеспечение энергоэффективности производства энергии, экономической доступности, бесперебойности и экологичность энергоснабжения потребителей. Предлагаемая интегрированная система энергоснабжения позволит создать благоприятные условия для социально-экономического развития, что особенно важно при развитии особых экономических зон. Значимость результатов заключается в том, что предложенная методология формирования системы энергоснабжения, учитывающая взаимосвязь процессов тепло- и электроснабжения и выбора состава оборудования мини-ТЭЦ в интегрированной системе энергоснабжения, позволяет повысить обоснованность принимаемых решений при развитии доступной и надежной энергетической инфраструктуры территорий.

**Ключевые слова:** особая экономическая зона, территория опережающего развития, система энергоснабжения, энергоэффективность, доступность, бесперебойность, распределенная энергетика.

**ВВЕДЕНИЕ**

В условиях трансформации экономического пространства многими странами стимулируется развитие особых территорий, способных аккумулировать конкурентные преимущества отдельно взятых локаций и предприятий.

В мировой практике, территорию на которой созданы определенные условия для ведения бизнеса (особые налоговые, административные и таможенные режимы, льготы и преференции) называют термином «особых экономических зон».

Также к указанным зонам относятся: зоны предпринимательства (Великобритания), технологические парки (США), технополисы (Япония), экспортно-производственные зоны макиладорас (Мексика), зоны приграничного экономического сотрудничества, бондовые зоны (Китай), территории опережающего развития (Россия) и другие.

Одним из критических условий функционирования экономических зон

является наличие готовой и доступной инфраструктуры, где особое внимание уделяется вопросам доступного и бесперебойного энергоснабжения.

Проблематика исследования экономических зон популярна в настоящее время и активно рассматривается учёными во многих странах. Например, вопросы особенностей функционирования в Индии отражены в [1], в Южной Корее в [2]. Взаимосвязь развития инфраструктуры экономических зон и урбанизации на Филиппинах отражена в [3], специфика России показана в [4-6].

В опубликованных исследованиях часто встречаются постулаты и доказательства о необходимости формирования привлекательных условий энергоснабжения резидентов в особых экономических зонах (ОЭЗ), однако практически отсутствуют предложения по формированию определенной структуры и состава системы электро- и теплоснабжения территорий ОЭЗ.

Отдельно в исследованиях выделяются направления энергоснабжения отдаленных и изолированных территорий, Арктики [7-11]. На данных территориях в силу экологических и экономических особенностей приоритетным зачастую рассматриваются применение возобновляемых источников энергии и создания гибридных энергосистем на основе дизельных электростанций и энергоустановок, работающих на возобновляемых источниках энергии [12-14].

Системы энергоснабжения в ОЭЗ, расположенных на территориях в зоне централизованного электроснабжения, строятся на привычных принципах, основанных на раздельном производстве тепловой и электрической энергии и присоединении к централизованным системам тепло- и электроснабжения [15, 16]. Данные решения предполагают в своей основе строительство котельной (либо расширение существующей) и строительство новых центров питания и линий высокого напряжения (либо реконструкции существующих), что часто приводит к высокой стоимости тепловой и электрической энергии для резидентов [17].

Такой подход, очевидно, устарел для территорий, целями создания которых являются: формирование благоприятных условий для привлечения инвестиций; обеспечение ускоренного социально-экономического развития; импортозамещение; производство передовых товаров и услуг.

Альтернативным эффективным вариантом может рассматриваться создание систем энергоснабжения на базе когенерации. При этом, согласно действующей институциональной среде, при формировании и развитии ОЭЗ первоначально применяются наилучших доступных технологий с учетом главенства долгосрочных решений над краткосрочными выгодами. Указанное подчеркивает актуальность рассмотрения иных вариантов формирования систем энергоснабжения на территории ОЭЗ, основанных на принципах энергоэффективности, экономической доступности и бесперебойности электроснабжения, определяющих новизну исследования и его отличия от существующих.

Гипотезой исследования является, что для территорий со статусом опережающего

развития и особых экономических зон необходим новый современный принцип формирования эффективной системы энергоснабжения. Цель исследования – разработка принципа формирования интегрированной системы энергоснабжения и методики выбора состава и структуры генерирующего оборудования системы энергоснабжения, позволяющей повысить доступность и бесперебойности энергоснабжения. Объектом исследования является территориальная система энергоснабжения. Предметом – повышение энергоэффективности энергоснабжения на территории.

### МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ВЫБОРА

Так как проблематика в области энергоснабжения ОЭЗ во многих странах сопоставима [1-6], воспользуемся методом аналогий для выбора решений при формировании эффективной системы энергоснабжения для ОЭЗ. В качестве примера рассмотрено функционирование ОЭЗ на территории России, как с позиций условий функционирования резидентов, так и с позиций особенностей формирования систем тепло- и электроснабжения.

На сегодняшний день статус территории опережающего развития (ТОР) и ОЭЗ присвоен 163 территориям в моногородах и закрытых административно-территориальных образованиях. Предполагается, что особый правовой режим ведения бизнеса и льготные условия подключения к инженерной инфраструктуре стимулируют создание и развитие производственных площадок, инновационных научно-исследовательских центров, IT-компаний на территории муниципального образования.

Суммарно в ОЭЗ ведут свою хозяйственную деятельность более 3100 резидентов, причем более 75% от общего числа зарегистрированы на 20 территориях. Причиной малой концентрации резидентов на отдельных территориях становится отсутствие транспортной и энергетической инфраструктуры [18]. Например, на территории опережающего развития Кондопога Республики Карелия сложности с привлечением новых инвесторов связаны с отсутствием энергетической инфраструктуры на свободных земельных участках [18]. Также в качестве примера можно указать на опыт организации деятельности резидентов на ТОР

Долматово в Курганской области, который показывает наличие противоречий между инвесторами и органами местного самоуправления в части энергообеспечения резидентов, что на текущий момент ставит под вопрос сохранение территорией статуса особой экономической зоны.

На Дальневосточных и Арктических территориях вопросы энергоснабжения зачастую решаются созданием изолированных систем, где основными источниками являются дизельная электростанция и котельная на угольном или дизельном топливе. Существует тенденция перехода на нетопливную энергетику. Например, для электроснабжения поселений на ТОР Чукотка предлагается реконструкция десяти дизельных электростанций в гибридные энергокомплексы с применением фотоэлектрических панелей стоимостью свыше 5 млрд. руб. На территории Камчатки прорабатывается проект строительства ГЭС,

ТЭЦ и ГеоЭС, по предварительным оценкам инвестиции в проект составят 120 млрд. руб.

Рабочий поселок Линево Новосибирской области имеет статус ТОР с 2018 года, однако присвоение территории статуса не привело к ожидаемому социально-экономическому развитию, наоборот, существует социальная напряженность, вызванная проблемами в коммунально-энергетической инфраструктуре. Аналогичная ситуация в рабочем поселке Горный Новосибирской области. Резидентами ТОР Новосибирской области могут стать энергоёмкие промышленные предприятия, однако на территории имеет место локальный дефицит электрической мощности (рисунок 1). Тепловые сети указанных муниципальных образований изношены в среднем на 64% и 85 % в Горном и Линево, соответственно. Такая ситуация приводит к росту потерь в теплосетях и повышению затрат на их поддержание в рабочем состоянии.

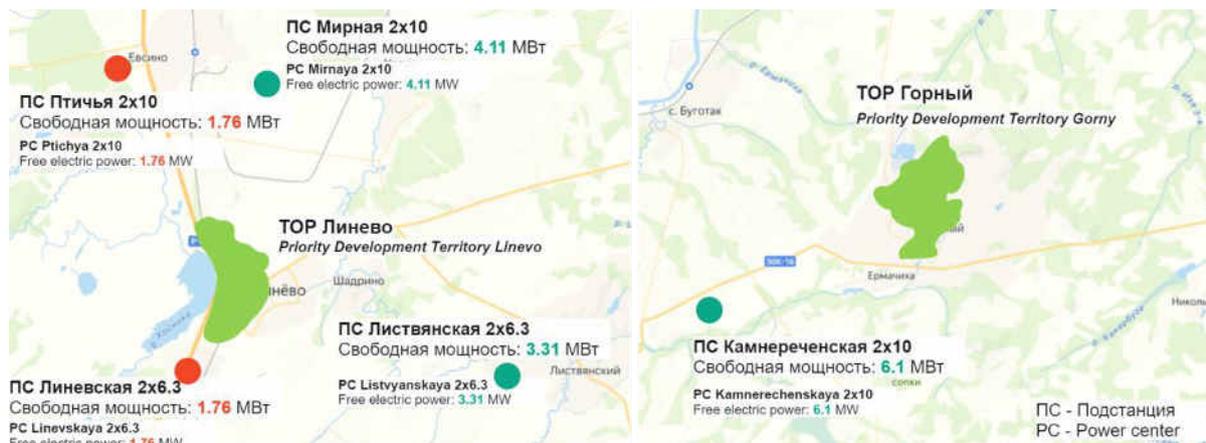


Рис. 1. Доступность электроснабжения территорий опережающего развития Линево и Горный.<sup>1</sup>

В таблице 1 систематизирован существующий опыт функционирования некоторых ТОР. Наблюдается снижение численности населения и ликвидация резидентов, высокая стоимость электроэнергии для промышленных и коммерческих потребителей, локальный дефицит мощности для технологического присоединения. Следовательно, можно сделать вывод о низкой доступности электроснабжения и об отсутствии предпосылок для социально-экономического развития на территориях. Необходима отличная методология формирования энергетической инфраструктуры.

В Новосибирской агломерации развивается зона опережающего развития «Наукополис», в состав которой включена территория инновационной и научно-образовательной деятельности «СмартСити-Новосибирск». Мастер-планом предусмотрен традиционный вариант энергообеспечения территории, основанный на присоединении к централизованной системе тепло - и электроснабжения.

Работа на стандартных принципах обуславливает высокую и не прогнозируемую стоимость электрической энергии для резидентов, в том числе из-за перекрестного субсидирования. Одновременно, существуют

<sup>1</sup> Appendix 1

примеры создания сбалансированных (мощностью, как правило, до 25 МВт) для локальных энергосистем с мини-ТЭЦ обеспечения энергоснабжения территории.

Таблица 1<sup>2</sup>.

Характеристика отдельных ОЭЗ<sup>3</sup>.

Территория (Territory)		Анжеро-Судженск (Anzhero-Sudzhensk)	г. Далматово (Dalmatovo)	р.п. Угловка (Uglovka)	р.п. Линево (Linevo)	р.п. Горный (Gornyy)
Год присвоения статуса (Year of status assignment)		2018	2018	2018	2018	2019
Население, тыс.чел. (Population, thousand people)	2018 г.	76.2	12.6	2.4	18.2	9.3
	2023 г.	68.1	12.5	2.3	18	9.4
Количество резидентов (Number of residents)	действующие (current)	2	3	4	4	5
	ликвидированные (liquidated)	6	6	0	3	0
Способ энергоснабжения (Form of energy supply)		Основной источник тепла – котельные Электроснабжение от подстанций 110/10 кВ (Heat – boiler rooms, Electricity from 110/10 kV power center)				
Свободная электрическая мощность для технологического присоединения в радиусе 5 км, МВА (Free electric power for technological connections within a radius of 5 km, MVA.)		25.6	2.01	0.203	1.73	0
Предельный уровень нерегулируемых цен, руб./кВтч (The maximum level of unregulated prices, RUB/kWh)		7.28	7.17	7.72	5.51	5,51
Тариф на электроэнергию для населения, руб./кВтч (Electricity rate for the population, RUB/kWh)		3.01	4.11	5.49	3.36	3.36
Разница тарифов, % (Tariff difference, %)		59	43	29	39	39
Диапазон тарифов на тепловую энергию, руб./кВтч (The range of tariffs for thermal energy, RUB/kWh)		1.66 – 4.16	1.8 – 2.15	2.43	1.75	1.04 – 1.91
Средняя зарплата, тыс. руб. (Average salary, thousand RUB)	2018 г.	40.5	25.7	23.6	26.3	25.2
	2023 г.	60.5	38.4	32.1	39.2	37.6
Доступность электроэнергии для населения в месяц, тыс. кВтч (Electricity availability for the population per month, thousand kWh)		20.1	9.3	5.8	11.7	11.2
Доступность тепла для населения в месяц, тыс. кВтч (Heat availability for the population per month, thousand kWh)		26.9	20.2	13.2	22.4	21.0

Эффективность такого решения, прежде всего, обуславливается близостью источника энергии к месту потребления и функционированием на розничном рынке электроэнергии (РРЭ). Указанное позволяет снизить сетевую составляющую передачи

электроэнергии по линиям 110 кВ и выше в стоимости электрической энергии для потребителей. Потребители реального сектора экономики, включенные в состав локальной энергосистемы, получают доступную по стоимости электроэнергию без

<sup>2,3</sup> Appendix 1

учета вне рыночных надбавок оптового рынка по стабильной и прогнозируемой стоимости.

Высокая инвестиционная привлекательность мини-ТЭЦ с газопоршневыми установками (ГПУ) подтверждается ростом числа сбалансированных локальных энергосистем для энергообеспечения промышленных, коммерческих, сельскохозяйственных предприятий и коммунально-бытового сектора.

Примером является локальная энергосистема микрорайона Березовое в г. Новосибирск. Имеющийся опыт формирования локальной системы энергоснабжения и получения эффектов может быть использован и распространен на территории со статусом особых экономических зон, а также на малые и средние города, где нагрузка сопоставима с электрическими мощностями мини-ТЭЦ. Актуальным для данных территорий является создание интегрированных систем энергоснабжения (ИСЭ), где взаимосвязанность территориальных систем тепло – и электроснабжения определяет эффективность энергоснабжения. Ключевым аспектом при создании ИСЭ является выбор состава и структуры генерирующего оборудования, формирующего во многом эффективность энергетической инфраструктуры.

Поэтому, формирование структуры ИСЭ на территории ОЭЗ включает следующие взаимосвязанные шаги: 1) Определение электрической мощности мини-ТЭЦ; 2) построение и анализ графиков тепловой и электрической нагрузки; 3) Выбор структуры и состава оборудования мини-ТЭЦ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### I. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ МИНИ-ТЭЦ В ИСЭ

ИСЭ представляет собой сбалансированную локальную энергосистему, основным источником энергии в которой является мини-ТЭЦ. Так как мини-ТЭЦ одновременно является производителем тепловой и электрической энергии, при выборе структуры и состава оборудования в ИСЭ важным является учет технических и экономических ограничений, а также особенностей работы ИСЭ и ее

взаимодействия с системой электроснабжения региона.

Для ИСЭ возможна работа в двух нормальных схемно-режимных состояниях – параллельно с централизованной энергосистемой и в режиме острова. Указанное позволяет повысить уровень бесперебойности электроснабжения потребителей в составе ИСЭ, повысить коэффициент использования установленной мощности когенерационного оборудования мини-ТЭЦ.

В условиях параллельной работы, установленная электрическая мощность мини-ТЭЦ ( $P_C$ ), согласно технологическим регламентам, не должна превышать 25 МВт. Располагаемая мощность станции ( $P'_C$ ) равна установленной при условии отсутствия технологических ограничений на режим работы генерирующей установки.

$$P_C = P'_C < 25 \quad (1)$$

Известно, что располагаемая мощность складывается из резервной и рабочей мощности ( $P_{SP}$  и  $P_{OP}$ ). Наличие резервной мощности обуславливается особенностями работы мини-ТЭЦ в ИСЭ и требованием обеспечить бесперебойное электроснабжение в режиме острова. Рабочая мощность складывается из мощности собственных нужд электроприемников энергетической инфраструктуры ИСЭ ( $P_N$ ) и максимальной мощности электрической нагрузки потребителей ИСЭ ( $P_{MAX}$ ) с учетом перспективного развития территории.

$$P'_C = P_{SP} + P_{OP} \quad (2)$$

$$P_{OP} = P_N + P_{MAX} \quad (3)$$

Размер электрической мощности, выдаваемой во внешнюю сеть региональной энергосистемы ( $P_{OUT}$ ), ограничен требованием исключить реверсивный переток в сеть высокого напряжения от районной подстанции.

Максимальная выдаваемая во внешнюю сеть электрическая мощность не должна превышать загрузки одного силового трансформатора подстанции в режиме минимальных нагрузок, что обычно не менее половины мощности трансформатора ( $P_{TR}$ ).

$$P_{OUT} = P_{MAX} - P_{LOAD} \quad (4)$$

$$P_{OUT} < 0,5 \cdot P_{TR} \quad (5)$$

где:  $P_{LOAD}$  – мощность нагрузки потребителей в составе ИСЭ.

## II. ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ ИСЭ

Для определения состава и структуры генерирующего оборудования необходима информация об электрической и тепловой нагрузке потребителей, включаемых в состав ИСЭ, – суточные и годовой графики нагрузки, максимальная сезонная мощность нагрузки, соотношение тепловой и электрической нагрузок. При отсутствии реальных графиков нагрузки допустимо использовать известные типовые графики для каждого типа потребителей.

Основными характеристиками графиков электрической нагрузки являются коэффициент неравномерности ( $\alpha$ ), плотности ( $\beta$ ) и формы ( $k_f$ ).

Зная эти показатели, можно построить суточный график по продолжительности в виде трех ступеней, характеризующих длительность максимальной ( $t_1$ ), минимальной ( $t_2$ ) и средней ( $t_3$ ) нагрузки, где соотношение длительности  $t_1$  и  $t_2$  связаны выражением (6).

$$\gamma = t_1/t_2 = (\beta - \alpha)/(1 - \beta) \quad (6)$$

Продолжительность средней нагрузки ( $t_3$ ) определяется на основе равенства коэффициентов формы трехступенчатого и исходного графика нагрузки. Коэффициент формы для трехступенчатого графика определяется следующим образом:

$$k_{f3} = \sqrt{t_1 \cdot (P_{MAX} - P_{AV})^2 + t_2 \cdot (P_{MIN} - P_{AV})^2} / P_{AV} \quad (7)$$

где:  $P_{AV}$  и  $P_{MIN}$  средняя и минимальная мощность нагрузки потребителей в составе ИСЭ.

Выражение (7) может быть представлено через характерные показатели графика нагрузки – коэффициенты плотности ( $\beta$ ) и неравномерности ( $\alpha$ ).

$$k_{f3} = \sqrt{t_2 \cdot (\gamma - 2\gamma\beta + \gamma\beta^2 + \alpha^2 - 2\alpha\beta + \beta^2)} / \beta \quad (8)$$

Учитывая равенство коэффициентов формы трехступенчатого и исходного графиков из (8), определяется продолжительность минимальной нагрузки ( $t_2$ ), после чего на основе (6) определяются  $t_1$  и  $t_2$ , что позволяет построить трехступенчатый сезонный суточный график электрической нагрузки по продолжительности (рисунок 2).

$$t_2 = (k_{fi}^2 \cdot \beta^2) / (\gamma - 2\gamma\beta + \gamma\beta^2 + \alpha^2 - 2\alpha\beta + \beta^2) \quad (9)$$

где:  $k_{fi}$  – коэффициент формы исходного  $i$ -ступенчатого графика нагрузки.



Рис.2. Пример трехступенчатого суточного зимнего графика потребителей ИСЭ. <sup>4</sup>

Годовой график электрической нагрузки по продолжительности (рисунок 3) строится на основе характерных трехступенчатых суточных графиков для зимних, летних и осенне-весенних суток (рисунок 2) с учетом продолжительности каждого сезона.

В качестве годового графика тепловой нагрузки потребителей по продолжительности (рисунок 3) используются график Россандера – Чистовича, построение которого производится по известной методике, исходя из особенностей климатической зоны и ее температурных характеристик, продолжительности отопительного периода.

<sup>4</sup> Appendix 1

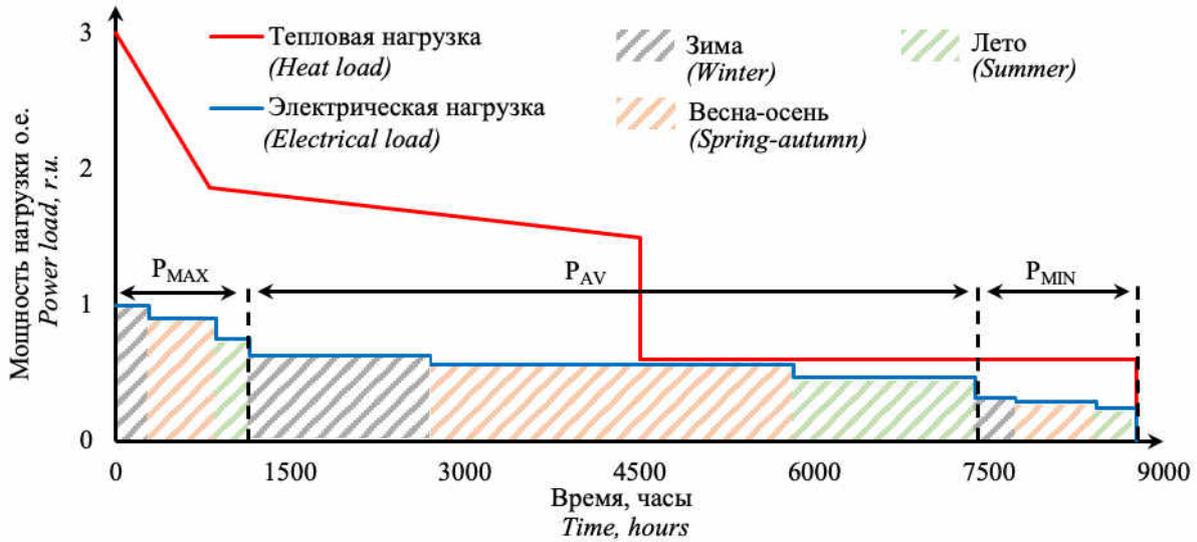


Рис. 3. Годовые графики электрической нагрузки потребителей ИСЭ. <sup>5</sup>

### III. СТРУКТУРА ОБОРУДОВАНИЯ МИНИ-ТЭЦ

Среди применяемых на мини-ТЭЦ типов когенерационного оборудования чаще встречаются газопоршневые (ГПУ) и газотурбинные (ГТУ) установки, паровые винтовые машины. Согласно указанным в [19] технико-экономическим характеристикам, для работы в энергетической инфраструктуре ОЭЗ приоритетно использование ГПУ.

Как и на крупных ТЭЦ с паросиловыми и парогазовыми установками, на мини-ТЭЦ с ГПУ невозможно осуществлять выработку электроэнергии без производства тепла. Однако если основной функцией крупных ТЭЦ является покрытие тепловой нагрузки, то ГПУ работают на покрытие электрической нагрузки, а отпускаемое ими тепло является вторичной продукцией, реализация которой повышает экономическую эффективность энергоснабжения. Чем больше загружено когенерационное оборудование, тем выше объем тепловой энергии, выработанной «попутно» в когенерационном цикле:

$$Q_C = K \cdot P_C \quad (10)$$

$$W_{QC} = K \cdot W_P = K \cdot P_C \cdot T_C \quad (11)$$

где,  $Q_C$  и  $P_C$  – установленная тепловая и электрическая мощности ГПУ,  $K$  – коэффициент когенерации, равный для ГПУ – 0.8...2,  $W_P$  и  $W_{QC}$  – электрическая и тепловая

энергия, вырабатываемая на ГПУ,  $T_C$  – КИУМ ГПУ.

В условиях резко континентального климата, обуславливающего более высокую потребность в тепловой энергии и мощности, чем в электрической, на мини-ТЭЦ, устанавливается дополнительное котельное оборудование, мощностью  $Q_B$ . Связь регулируемой мощности котельного оборудования  $\Delta Q_B$  и мощности электрической нагрузки можно установить, зная конфигурацию суточного графика электрической нагрузки, определив разницу максимальных и минимальных электрических нагрузок ( $P_{MAX}$  и  $P_{MIN}$ ), рисунок 4.

$$\Delta Q_B = (P_{MAX} - P_{MIN}) \cdot K = (1 - \alpha) \cdot P_{MAX} \cdot K \quad (12)$$

где:  $K$  – коэффициент когенерации,  $\alpha$  – коэффициент неравномерности графика нагрузки.

Суммарная тепловая мощность мини-ТЭЦ ( $Q_{CHPP}$ ) складывается из тепловой мощности когенерационного ( $Q_C$ ) и котельного оборудования ( $Q_B$ ) с учетом необходимого регулировочного диапазона ( $\Delta Q_B$ ), максимальной тепловой нагрузки ( $Q_{MAX}$ ) и резервирования ( $Re$ ), как правило равного 25 %.

$$Q_{CHPP} = Q_C + Q_B \quad (13)$$

$$Q_B = Q_{MAX} \cdot Re - Q_C + \Delta Q_B \quad (14)$$

Основная задача при выборе состава оборудования мини-ТЭЦ в ИСЭ сводится к определению доли когенерационного оборудования и его участия в покрытии

тепловой нагрузки. Необходимо обеспечить максимальную выработку электроэнергии в сочетании с минимумом «рассеивания» тепла в окружающую среду, рисунок 5.

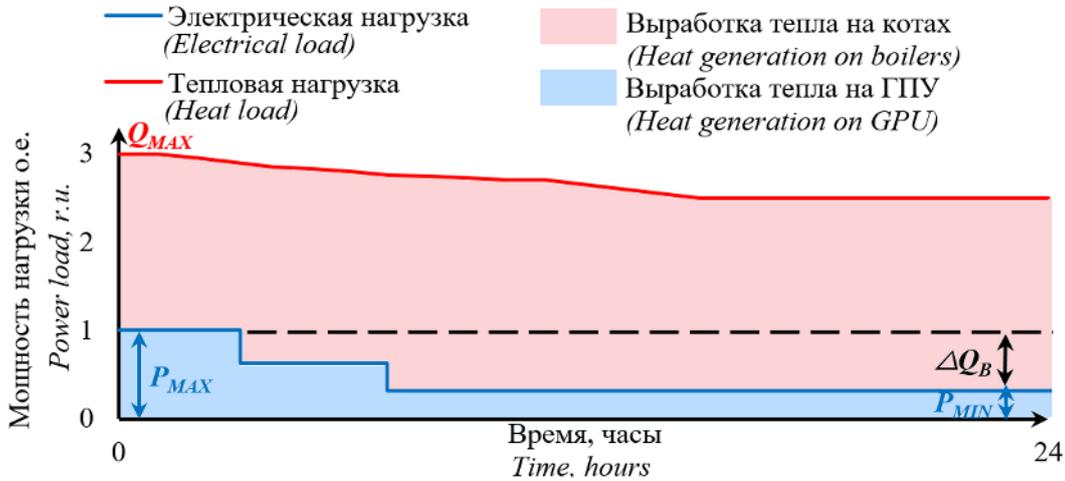


Рис.4. Суточный зимний график нагрузки. <sup>6</sup>

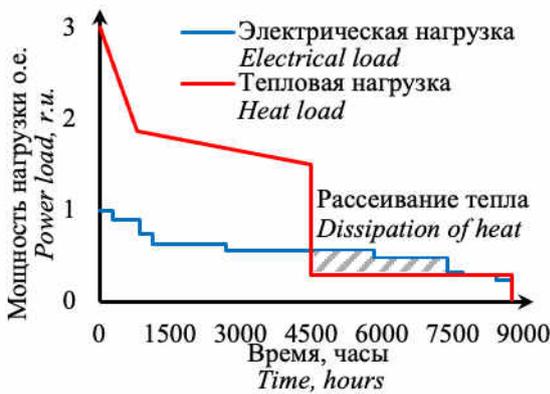


Рис.5. Пример участия ГПУ в покрытии спроса на тепловую и электрическую энергию в ИСЭ. <sup>7</sup>

Сопоставление графиков по продолжительности тепловых и электрических нагрузок, покрытие которых осуществляется мини-ТЭЦ, позволяет определить требования к мощностям установленных на них когенерационных и котельных установок ( $P_C$ ,  $Q_C$ ,  $Q_B$ ), выработку соответствующей энергии ( $W_P$ ,  $W_{QC}$ ,  $W_{QB}$ ), коэффициент использования установленных мощностей когенерационного ( $T_C$ ) и котельного оборудования ( $T_B$ ).

Возможна ситуация, когда в интересах повышения КИУМ когенерационного оборудования будет реализована выдача электрической энергии на розничный рынок и тогда увеличится объем выработанной тепловой энергии ГПУ, которая может быть

полезно использована. Однако в общем случае следует учитывать, что не вся выработка тепла на ГПУ направляется в систему теплоснабжения, а только ее доля, которую можно относить к полезному использованию тепла. Как видно из рисунков 3 и 5 эта доля зависит от спроса на тепло в межотопительный период, когда имеется электрическая нагрузка, но уже нет потребности в отоплении.

Одним из вариантов исключения тепловых выбросов в межотопительный период являются получившие определенное распространение тепловые накопители, тепловые насосы и абсорбционные холодильные машины (АБХМ) [20-24].

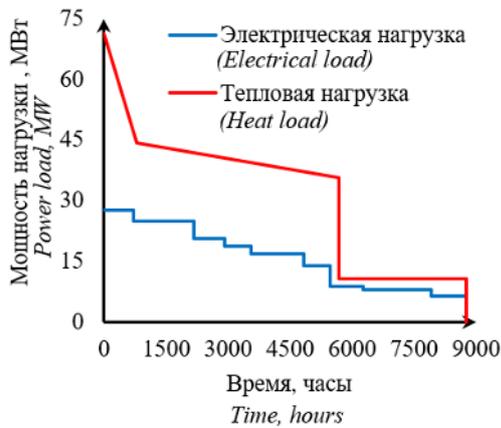
### ПРИМЕР ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ОЭЗ

Предложенный в исследовании принцип формирования системы энергоснабжения территории апробирован на примере территории инновационной и научно-образовательной деятельности «СмартСити-Новосибирск», объединяющей ИТ-компании, научно-исследовательские и медицинские центры, промышленные и технопарки.

Предлагаемый мастер-планом вариант энергоснабжения основан традиционных технических решениях. Создание ИСЭ с мини-ТЭЦ позволит предложить резидентам территории систему энергоснабжения с интеллектуальной системой управления на

базе отечественных разработок и элементной базы. Созданная система будет отличаться высокой экономичностью, надежностью и экологичностью, что подтверждается нижеприведенными результатами расчетов.

Опираясь на открытые данные, приведенные в мастер-плане развития территории, были проанализированы климатические условия территории, направления деятельности резидентов, максимальная мощность нагрузки формирования совмещенного годового графика (рисунок 6).



**Рис.6. Годовые совмещенные графики тепловой и электрической нагрузки «СмартСити-Новосибирск».**<sup>8</sup>

Максимальная суммарная мощность совмещенных электрической и тепловой нагрузок «СмартСити-Новосибирск» составляют 27.6 МВт и 71.6 МВт, соответственно. Учитывая ограничение на установленную электрическую мощность мини-ТЭЦ и наличие 17.8 МВт свободной мощности на близлежащих подстанциях, предлагается создание комбинированной системы. В предлагаемой системе наиболее ответственные потребители формируют ИСЭ с мини-ТЭЦ мощностью от 16 до 25 МВт, что позволит обеспечить баланс мощности при максимальной нагрузке 27.6 МВт с резервированием не менее 20%. Потребители, не вошедшие в зону ИСЭ, будут обеспечены электрической энергией от близлежащих подстанций, имеющих небольшой запас свободной мощности (ПС Барышевская и ПС Силикатная), тепловой – от Тепловой станции №2, имеющей 61 МВт свободной мощности.

По представленной в статье методике рассмотрено несколько вариантов состава и структуры мини-ТЭЦ и определено, что оптимальным является создание ИСЭ на базе

мини-ТЭЦ электрической мощностью 24.4 МВт и включение в ИСЭ потребителей суммарной мощностью 22.2 МВт. При расчете коэффициентов использования установленной мощности когенерационного оборудования рассматривалось два варианта: с выдачей тепла на соседние территории и без нее. Согласно выполненным расчетам, таблица 2, получено, что при наличии возможности использования избыточной тепловой энергии годовой КИУМ КГУ возрастает до 65%.

Таблица 2<sup>9</sup>.

Результаты расчетов КИУМ КГУ<sup>10</sup>.

Характеристика (Characteristic)		Вариант (Option)	
		1	2
КИУМ (capacity factor), %	Зима (winter)	70	70
	Осень-весна (autumn-spring)	62	66
	Лето (summer)	38	56
	Год (year)	58	65
Электроэнергия (electricity), ГВт·ч		121.6	135.7
Тепло (heat), ГВт·ч		121.6	135.7

*Примечание: в расчётах не учитывалась выдача вне территории «СмартСити-Новосибирск».*

Для установки на мини-ТЭЦ выбраны 8 ГПУ 3.05 МВт отечественного производителя. Дополнительно к КГУ предлагается установка двух котлов мощностью 20.5 и 11 МВт, таблица 3.

Таблица 3<sup>11</sup>.

Характеристика системы комбинированного энергоснабжения<sup>12</sup>.

Источник (Source)	Мощность, МВт (Power, MW)	
	Электрическая (Electric)	Тепловая (Heat)
КГУ мини-ТЭЦ (Co-generation equipment)	24.4	24.4
Котельное оборудование мини-ТЭЦ (Boilers)	-	31.5
ПС Силикатная (Power center Silikatnaya)	9.29	-
ПС Барышевская (Power center Baryshevskaya)	8.49	-
Тепловая станция №2 (Boiler room)	-	50
Итого (Total)	42.18	105.9

Размер капиталовложений на создание мини-ТЭЦ, оснащенной автоматикой, позволяющей создать сбалансированную интегрированную систему энергоснабжения, оценивается в 1 700 млн. руб. в ценах 2023 года, что более, чем в 1.6 раза дешевле строительства одной котельной, предусмотренной решениями в мастер-плане.

Предлагаемая система энергоснабжения отличается высокой экономичностью, надежностью и экологичностью.

- **Экономичность.** Согласно проведенным расчетам, себестоимость производства электроэнергии не превысит 1.1 руб/кВтч, срок окупаемости проекта составит не более 4 лет, даже при условии продажи всего объема электроэнергии по стоимости равной тарифу для населения.

- **Надежность.** Создание комбинированной системы позволит обеспечить балансовую и режимную надежность электроснабжения и иметь около 53 % избыточной электрической мощности. Резерв в системе теплоснабжения составит около 50%.

- **Экологичность.** На мини-ТЭЦ будет производиться 121 600 МВт·ч электроэнергии в год, что будет сопровождаться выбросами 54 200 тонн CO<sub>2</sub> эквивалента. Данная выработка позволит сократить производство электроэнергии на угольной тепловой станции на указанную величину, что приведет к уменьшению суммарных годовых выбросов на 74 000 тонны CO<sub>2</sub> эквивалента. Аналогичный экологический эффект может достигаться при работе солнечной электростанции мощностью 50 МВт.

## ДИСКУССИЯ

Наличие множества источников тепловой энергии, функционирующих в составе территориальной системы энергоснабжения, требует создания соответствующей системы управления, позволяющей осуществлять мониторинг, контроль и регулирование процессов производства, передачи и потребления не только электрической энергии в зависимости от внешних условий, интересов потребителей и производителей на территории, но и тепловой.

Вопросы интеллектуализации систем электроснабжения довольно подробно изучены и решены в рамках исследований функционирования локальных интеллектуальных энергосистем [25,26].

Вопросы интеллектуализации систем теплоснабжения мало освещены в литературе. В исследованиях существует понятие интеллектуальных тепловых сетей – Smart thermal grids. Как правило, оно встречается в материалах, посвященных переходу на четвертое и выше поколение системы теплоснабжения района или муниципального образования [27]. Под концепцией интеллектуальных тепловых сетей понимается включение в систему теплоснабжения тепловых аккумуляторов и насосов в сочетании с другими энергоэффективными источниками тепла. Smart thermal grids характеризуются использованием трубопроводов меньшего диаметра, что в сочетании с низкотемпературным тепловым носителем позволяет снизить потери тепла в 4 раза [28]. Для потребителей, при этом, характерно активное взаимодействие с тепловой сетью – управление спросом и предложением [29]. Начальным этапом интеллектуализации системы считается установка тепловых счетчиков, осуществляющих непрерывный контроль температуры у потребителей [28,29]. Некоторые авторы предлагают использование искусственного интеллекта как основы интеллектуализации индивидуальных систем теплоснабжения с позиции теплового комфорта потребителей [30-32].

Однако отсутствуют материалы, посвященные интеллектуализации централизованной системы теплоснабжения с комплексным подходом к энергосбережению и энергетической эффективности, организации взаимодействия когенерационного оборудования, тепловых накопителей, электробойлеров и т.д. При этом существует активное развитие тематики мультиагентного управления электрической сетью, как в российский [33-35], так и в европейских исследованиях [36-38]. Наблюдается очевидный разрыв между теплом и электричеством, хотя общеизвестно, что их сочетание позволит достичь максимальной эффективности при производстве энергии и энергосбережения при потреблении.

Решением указанного противоречия может служить распространение опыта децентрализованного управления и принципов мультиагентного регулирования в системах электроснабжения [26,35] на

системы теплоснабжения, где агентами станут потребители и производители тепла. Организация эффективного взаимодействия между агентами потребует цифровизации и интеллектуализации системы. Необходимо и целесообразно создание системы управления с учетом взаимосвязанности процессов производства и потребления тепла в ИСЭ с ориентацией на максимизацию полезного использования тепла когенерационного

оборудования (рисунок 7). Особенно важным решение проблемы является для территорий особых экономических зон, где эффективность функционирования энергетической инфраструктуры напрямую определяет эффективность работы резидентов ОЭЗ, что следует рассматривать в качестве задач будущих исследований в направлении формирования эффективных ИСЭ.

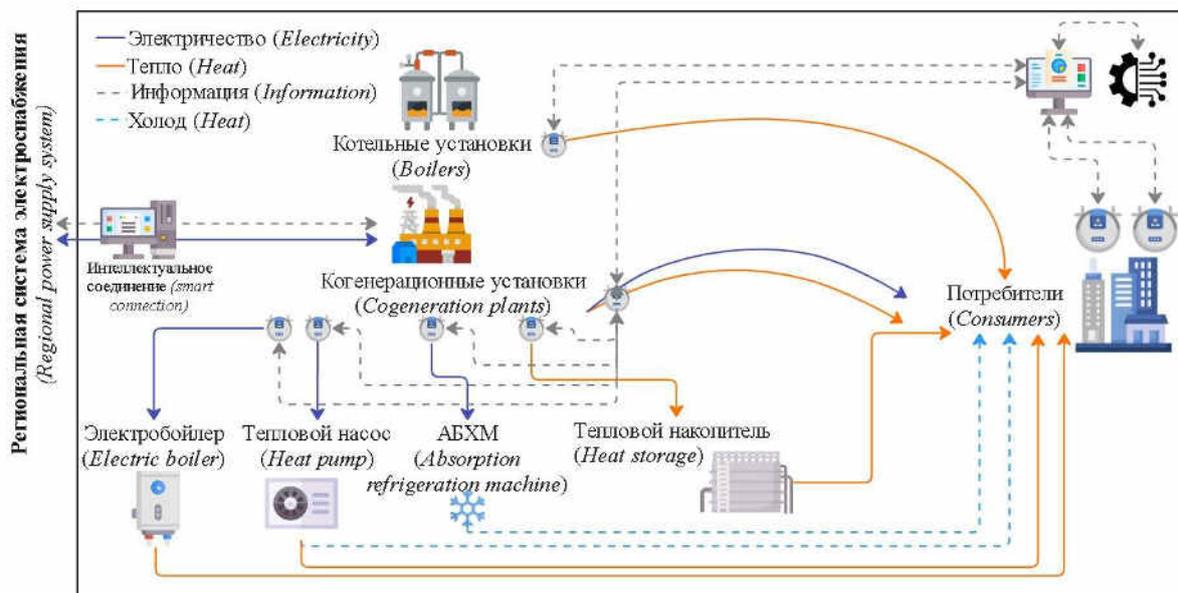


Рис. 7. Организация системы управления в ИСЭ. <sup>13</sup>

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Доступность энергоснабжения на территориях со статусом опережающего развития, особых экономических зон во многом определяет инвестиционную привлекательность территории и, как следствие, потенциал социально-экономического развития. Формирование на территориях особых экономических зон интегрированных систем энергоснабжения на базе мини-ТЭЦ позволит предложить их резидентам доступное и бесперебойное энергоснабжение, что обеспечивается использованием инновационных энергоэффективных технологий, близостью источника к месту потребления, а также наличием связей с региональной системой.

В исследовании предложена комплексная методика формирования структуры и состава оборудования мини-ТЭЦ в интегрированной системе энергоснабжения, обеспечивающая максимальную топливную эффективность производства энергии и энергоэффективность

системы энергоснабжения. Разработанная методика основана на сопоставлении годовых и суточных графиков тепловой и электрической нагрузки с целью обеспечения максимальной выработки электроэнергии в сочетании с минимумом «рассеивания» тепла в окружающую среду.

Применение предложенных моделей и методов позволит формировать системы энергоснабжения территорий, обеспечивающих повышение энергоэффективности, экономической доступности, бесперебойности и экологичности энергоснабжения потребителей.

Полученные результаты применены при решении задачи формирования системы энергоснабжения на территории «СмартСити-Новосибирск». Согласно разработанной методике, предлагается формирование комбинированной системы энергоснабжения, включающей ИСЭ на основе мини-ТЭЦ электрической мощностью 24.4 МВт и

тепловой 55.9 МВт. Окупаемость данной системы не превысит 4 лет при условии обеспечения экономически доступного электроснабжения для резидентов территории.

В части повышения энергоэффективности определены технологии, включение которых в состав энергосистемы позволит повысить коэффициент использования установленных мощностей когенерационного оборудования мини-ТЭЦ и энергетическую эффективность. К таким технологиям относят тепловые насосы, электробойлеры и накопители тепла. Однако появление дополнительных источников тепловой энергии требует интеллектуализации систем теплоснабжения и создание систем управления на мультиагентном принципе, что рассматривается как направление дальнейших исследований.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

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

### APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

<sup>1</sup>**Fig. 1.** Availability of power supply to the territories of advanced development of Linevo and Gorny.

<sup>2,3</sup>**Table 1.** Characteristics of individual special economic zones.

<sup>4</sup>**Fig. 2.** An example of a three- step daily winter load chart of an integrated energy supply system (IES).

<sup>5</sup>**Fig. 3.** Annual graphs of electrical load for ISE consumers.

<sup>6</sup>**Fig. 4.** Daily winter load chart.

<sup>7</sup>**Fig. 5.** An example of the participation of the GPU in covering the demand for thermal and electrical energy in the ISE.

<sup>8</sup>**Fig. 6.** Annual combined graphs of thermal and electrical loads «SmartCity-Novosibirsk».

<sup>9,10</sup>**Table 2.** Results of calculations of capacity factor of cogeneration plants.

<sup>11,12</sup>**Table 3.** Characteristics of the combined energy supply system.

<sup>13</sup>**Fig. 7.** Organization of the management system in ISE.

### Литература (References)

[1] Alkon M. Do special economic zones induce developmental spillovers? Evidence from India's states. *World Development*, 2018, no. 107, pp. 396-409.

- [2] Song H., Lynch M. J. Restoration of nature or special interests? A political economy analysis of the four major rivers restoration project in South Korea. *Critical Criminology*, 2018, no. 26, pp. 251-270.
- [3] Kleibert J.M. Exclusive Development(s): Special Economic Zones and Enclave Urbanism in the Philippines. *Critical Sociology*, 2018, vol. 44, no. 3, pp. 471-485.
- [4] Vertakova Yu., Plotnikov V. Russian and Foreign Experience of Interaction Be-tween Government and Business. *World Applied Sciences Journal*, 2013, no. 28 (3), pp. 411-415.
- [5] Asaul A. N., Asaul M. A., Levin Yu. A., Platonov A. M. Energosnabzhenie izolirovannyh territorij v kontekste privlecheniya investicij i razvitiya ekonomiki regiona [Energy supply to isolated areas in the context of attracting investment and developing the regional economy]. *Ekonomika regiona – Economy of the region*, 2020, vol. 16, no. 3., pp. 884- 895. doi: 10.17059/ekon.reg.2020-3-16 (In Russian)
- [6] Sosnovskikh S. Industrial clusters in Russia: The development of special economic zones and industrial parks. *Russian Journal of Economics*, 2017, vol. 3, no. 2, pp. 174-199.
- [7] Kwon S., Won W., Kim J. A superstructure model of an isolated power supply system using renewable energy: Development and application to Jeju Island, Korea. *Renewable Energy*, 2016, vol. 97, pp. 177-188.
- [8] Ilyushin P. V., Pazderin A. V. Approaches to Organization of Emergency Control at Isolated Operation of Energy Areas with Distributed Generation. *2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon)*, Chelyabinsk, Russia, 2018, pp. 149-155. doi: 10.1109/URALCON.2018.8544361.
- [9] Yaroshevich V. V., Karpov A. S. Challenges in Power Supply of the Arctic. *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934031.
- [10] Parida A., Choudhury S., Chatterjee D. Microgrid Based Hybrid Energy Co-Operative for Grid-Isolated Remote Rural Village Power Supply for East Coast Zone of India. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 3, pp. 1375-1383. doi: 10.1109/TSTE.2017.2782007.
- [11] Romasheva, N.; Dmitrieva, D. Energy Resources Exploitation in the Russian Arctic: Challenges and Prospects for the Sustainable Development of the Ecosystem. *Energies*, 2021, no. 14, p.8300. doi: 10.3390/en14248300
- [12] Stroykov G., Cherepovitsyn A. Y., Iamshchikova E. A. Powering multiple gas condensate wells in Russia's arctic: Power supply systems based on

- renewable energy sources. *Resources*, 2020, vol. 9, no. 11, p. 130. doi: 10.9770/jesi.2020.7.4(51)
- [13] Tishkov, S., Shcherbak, A., Karginova-Gubinova, V., Volkov, A., Tleppayev, A., Pakhomova, A. Assessment the role of renewable energy in socio-economic development of rural and Arctic regions. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 2020, no. 7(4), pp. 3354-3368. doi:10.9770/jesi.2020.7.4(51)
- [14] Morgunova, M. O., Solovyev, D. A., Nefedova, L. V., & Gabderakhmanova, T. S. Renewable energy in the Russian Arctic: Environmental challenges, opportunities and risks. *Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing*, 2020, vol. 1565, no. 1, p. 012086. doi: 10.1088/1742-6596/1565/1/012086
- [15] Ndera substation to stabilize power supply in Kigali Special Economic Zone. *Rwanda Energy Group Limited*. Available at: <https://www.reg.rw/media-center/news-details/news/ndera-substation-to-stabilize-power-supply-in-kigali-special-economic-zone/> (accessed 21.03.2013)
- [16] Senelec to commission first high voltage substation in Sandiara SEZ. *Energy Capital & Power*. Available at: <https://energycapitalpower.com/senelec-hv-substation-sandiara-sez/> (accessed 21.03.2013)
- [17] Power tariff at SEZ increased 8%, firms call it extra burden. *The times of India*. Available at: <https://timesofindia.indiatimes.com/city/indore/power-tariff-at-sez-increased-8-firms-call-it-extra-burden/articleshow/71929689.cms> (accessed 21.03.2024)
- [18] Maria Perevoshchikova. Small but not successful: every fifth single-industry town risks losing benefits [Mal, da ne udal: kazhdyj pyatyj monogorod riskuet lishit'sya l'got]. *Izvestiya – News*. Available at: <https://iz.ru/1083775/mariia-perevoshchikova/mal-da-ne-udal-kazhdyi-piatyi-monogorod-riskuet-lishitsia-lgot> (accessed: 08.10.2023) (In Russian)
- [19] Gil'Manshin I. R. et al. Mini-Central heating and Power Plant (CHP): the choice of the optimal structure and modes of operation //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2014, vol. 69, no. 1. doi: 10.1088/1757-899X/69/1/012008 (accessed 03.12.2023)
- [20] Saloux, E.; Candanedo, J.A. Sizing and control optimization of thermal energy storage in a solar district heating system. *Energy Report*, 2021, vol. 7, pp. 389–400. doi: 10.1016/j.egy.2021.08.092
- [21] Ma, T., Wu, J., Hao, L., Lee, W.J., Yan, H., Li, D. The optimal structure planning and energy management strategies of smart multi-energy systems. *Energy*, 2018, vol. 160, pp. 122–141. doi: 10.1016/j.energy.2018.06.198
- [22] Hennessy, J., Li, H., Wallin, F., Thorin, E. Flexibility in thermal grids: A review of short-term storage in district heating distribution networks. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 2430-2434. doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.302
- [23] Sayegh, M. A., Jadwiszczak, P., Axcell, B. P., Niemierka, E., Bryś, K., Jouhara, H. Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating. *Energy and Buildings*, 2018, vol. 166, pp. 122-144. doi:10.1016/j.enbuild.2018.02.006
- [24] Osterman E., Stritih U. Review on compression heat pump systems with thermal energy storage for heating and cooling of buildings. *Journal of Energy Storage*, 2021, vol. 39, pp. 102569 doi: 10.1016/j.est.2021.102569
- [25] Fishov A. G. Technical and economic aspects of creating minigrids and their integration with centralized energy supply [Tekhnicheskie i ekonomicheskie aspekty sozdaniya minigridov i ih integracii s centralizovannym energosnabzheniem] *Energetik*, 2022, no. 4, pp. 27-34. (In Russian)
- [26] Ilyushin, P., Volnyi, V., Suslov, K., Filippov, S. State-of-the-Art Literature Review of Power Flow Control Methods for Low-Voltage AC and AC-DC Microgrids. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 7, p. 3153. doi: 10.3390/en16073153
- [27] Lorenzen, P., Janßen, P., Winkel, M., Klose, D., Kernstock, P., Schrage, J., Schubert, F. Design of a Smart Thermal Grid in the Wilhelmsburg district of Hamburg: Challenges and approaches. *Energy Procedia*, 2018, vol. 149, pp. 499-508. doi: 10.1016/j.egypro.2018.08.214
- [28] Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., Mathiesen, B. V. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, 2014, vol. 68, pp. 1-11. doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089.
- [29] Buffa, S., Cozzini, M., D'antoni, M., Baratieri, M., Fedrizzi, R. 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol. 104, pp. 504-522. doi: 10.1016/j.rser.2018.12.059
- [30] Merabet, G. H., Essaaidi, M., Haddou, M. B., Qolomany, B., Qadir, J., Anan, M., Al-Fuqaha A., Abid M.R., Benhaddou, D. Intelligent building control systems for thermal comfort and energy-efficiency: A systematic review of artificial intelligence-assisted techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 144, p. 110969. doi: 10.1016/j.rser.2021.110969
- [31] Zhao, X., Yin, Y., He, Z., & Deng, Z. State-of-the-art, challenges and new perspectives of thermal comfort demand law for on-demand intelligent control of heating, ventilation, and air condi-

- tioning systems. *Energy and Buildings*, 2023, p. 113325.
- [32] Nägele F., Kasper T., Girod B. Turning up the heat on obsolete thermostats: A simulation-based comparison of intelligent control approaches for residential heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 75, pp. 1254-1268.
- [33] Fishov A. G., Klavsuts I. L., Klavsuts D. A. Multi-agent regulation of voltage in smart grid system with the use of distributed generation and customers. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 761-767.
- [34] Loskutov A. B., Kulikov A. L., Ilyushin P. V. From the GOELRO plan to the digitalization of the country's electric power complex [Ot plana GOELRO k cifrovizacii elektroenergeticheskogo kompleksa strany]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2020, vol. 12, pp. 14-30.
- [35] Fishov, A., Osintsev, A., Ghulomzoda, A., Marchenko, A., Kokin, S., Safaraliev, M., Zicmane, I. Decentralized Emergency Control of AC Power Grid Modes with Distributed Generation. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 15, p. 5607. doi:10.3390/en16155607
- [36] Al Faiya, B., Athanasiadis, D., Chen, M., McArthur, S., Kockar, I., Lu, H., De Leon, F. A self-organizing multi-agent system for distributed voltage regulation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, vol. 12, no. 5, pp. 4102-4112. doi: 10.1109/TSG.2021.3070783
- [37] Zheng, S., Shi, P., Agarwal, R. K., Lim, C. P. Periodic event-triggered output regulation for linear multi-agent systems. *Automatica*, 2020, vol. 122, p. 109223. doi: 10.1016/j.automatica.2020.109223
- [38] Cao, D., Hu, W., Zhao, J., Huang, Q., Chen, Z., Blaabjerg, F. A multi-agent deep reinforcement learning based voltage regulation using coordinated PV inverters. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, vol. 35, no. 5, pp. 4120-4123.

**Сведения об авторах.**



**Бык Феликс Леонидович**, к.т.н., доцент каф. Автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: управление развитием, распределенная энергетика, надежность.  
E-mail: [felixbyk@hotmail.com](mailto:felixbyk@hotmail.com)



**Мышкина Людмила Сергеевна**, к.т.н., доцент каф. Автоматизированных электроэнергетических систем, вед. науч. сотрудник НОЦ «Интеллектуальная энергия» Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: интеллектуализация энергосистем, эффективность функционирования энергосистем, распределенная энергетика.  
E-mail: [Lsmyshkina@gmail.com](mailto:Lsmyshkina@gmail.com)



**Иванова Елизавета Михайловна**, лаборант-исследователь НОЦ «Интеллектуальная энергия» Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: системы энергоснабжения, моделирование, распределенная энергетика.  
E-mail: [lizai2000@mail.ru](mailto:lizai2000@mail.ru)