

МЕТОД И МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ РАЗВИТИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА СПРОС И ЦЕНУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РЕГИОНЕ

Гальперова Елена Васильевна

к.т.н., доцент, старший научный сотрудник, e-mail: galper@isem.irk.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН

664033, г. Иркутск, Россия, ул. Лермонтова, 130.

Аннотация. Актуальность статьи обусловлена переходом энергетики на путь интеллектуального развития. Одной из характеристик этого перехода является расширение перспектив децентрализованного производства электроэнергии. В новых условиях у потребителя появляется возможность изменять свое энергопотребление в зависимости от стоимости энергоресурсов, иметь собственные установки по производству и/или хранению электроэнергии. В статье кратко представлены особенности использования и технологии распределенной генерации (РГ) энергии в отдельных секторах экономики (промышленности, жилом и коммерческом секторах, на транспорте). Приведены некоторые способы определения перспективных значений мощностей РГ у потребителей. Предложен подход к моделированию и оценке влияния масштабов распределенной генерации на долгосрочное развитие региональных систем энергоснабжения. Отличительной чертой подхода является использование ранее разработанной оптимизационной стохастической модели объединенной энергосистемы макрорегиона в качестве основы для разработки ее региональной модификации и источника прогнозной информации об условиях развития региональной энергосистемы. Несмотря на то, что предложенный подход дает лишь приблизительную оценку, это позволяет очертить перспективный диапазон изменения стоимости и спроса на электроэнергию в регионе при разных вариантах развития РГ.

Ключевые слова: прогнозирование, распределенная генерация, потребители, энергоносители, спрос, ТЭК, электроэнергетика, Монте-Карло, оптимизация, неопределенность.

Цитирование: Гальперова Е. В. Метод и модели для оценки влияния развития распределенной генерации на спрос и цену электроэнергии в регионе // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 3 (23). С. 101-116. DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.009.

Введение. В существующей практике исследования перспективных направлений развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России [1-4] определение структуры производства энергоносителей и объемов расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в комплексе осуществляется на основе удовлетворения заранее определенной потребности в энергоносителях экономики, внешней по отношению к ТЭК. При этом прогнозирование потребности в ТЭР, осуществляется, в первую очередь, для страны в целом. Энергопотребление территорий определяется, как правило, на основе региональной структуры энергопотребления последнего доступного отчетного года, скорректированного с учетом принятых к осуществлению инвестиционных проектов. Подобный подход был правомерным, поскольку взаимоотношения потребителя и производителя были основаны на однонаправленном потоке энергоресурсов от производства к потреблению. При переходе энергетики на путь интеллектуального развития¹ основной тенденцией становится децентрализация производства энергии, важным звеном в которой является потребитель. В новых условиях у него появляются возможности изменять свое энергопотребление при изменении стоимости энергоресурсов, а также иметь собственные установки по производству и/или хранению электроэнергии. Потребитель-производитель (просьюмер),

¹ проект «Цифровая энергетика», Стратегия «Цифровая трансформация электроэнергетики России» <https://minenergo.gov.ru/node/17936>

меняет схему и величину потоков электроэнергии в энергосистемах и может повлиять на результаты оптимизации ТЭЖ. В этой связи все большую актуальность приобретают исследования на уровне регионов, где происходит согласование интересов производителей и потребителей энергии, оценка условий, возможностей и масштабов распределенной генерации. Изменение условий развития региональных систем энергоснабжения требует новых подходов к прогнозным исследованиям перспективных направлений энергетики.

1. Распределенная генерация. Пока не существует единого общепризнанного определения понятия распределенная генерация энергии. Разные специалисты относят к ней производство энергии в децентрализованных энергосистемах (не подключенным к магистральным энергосетям), использование энергоисточников мощностью до 25 МВт и/или 20 Гкал/ч, системы когенерации (совместного производства электроэнергии и тепла), системы с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и др. [5-7].

В [8] указано, что «распределенная генерация есть выработка электроэнергии/тепла по месту ее потребления. Отсутствие сети исключает потери (затраты) на передачу электроэнергии/тепла. При этом подразумевается наличие множества потребителей, которые производят электрическую/тепловую энергию для собственных нужд, направляя ее излишки в общую сеть».

В мире малая распределенная энергетика вот уже несколько десятилетий является ведущим трендом. По оценкам экспертов данная тенденция сохранится в ближайшее десятилетие. В [9] предполагается, что в мире мощность РГ вырастет с 132,4 ГВт в 2017 г. до 528,4 ГВт в 2026 г. По результатам исследований Международного энергетического агентства, распределенная энергетика может обеспечить до 75% новых подключений в ходе глобальной электрификации до 2030 г. [10]. В [11] отмечается, что «развитие распределенной генерации, в том числе собственной генерации предприятий, становится экономически целесообразным из-за развития современных технологий, обеспечивающих сопоставимые стоимостные показатели централизованной и распределенной генерации, а также ввиду общего тренда на вовлечение в топливно-энергетический баланс экологически чистых способов производства электроэнергии». Корпоративная микрогенерация активно развивается, в том числе, благодаря государственным субсидиям на установку собственных мощностей у предприятий и населения. Например, в Германии запущен механизм частичной компенсации стоимости оборудования с бесплатным подключением к сетям.

Точных данных по доле распределенной генерации и динамике ее изменения в российской энергетике практически нет. В [10] суммарная мощность объектов распределенной генерации в России по состоянию на 2017 г. оценивалась величиной около 23-24 ГВт или 9-9,5%. Представленные там же исследования показывают, что в сценарии полного использования потенциала распределенной энергетике с ее помощью возможно закрыть всю прогнозную потребность в генерирующих мощностях в ЕЭС России к 2035 г. в размере 54-66 ГВт.

2. Особенности использования и технологии распределенной генерации в разных секторах экономики.

Промышленность. Распределенная генерация востребована на предприятиях добывающей промышленности (например, нефтяной и газовой), машиностроения, обрабатывающей промышленности, лесопромышленного комплекса, а также на производствах непрерывного цикла, где остановка процесса чревата серьезными технологическими и экономическими последствиями (например, стекольной) [11].

Основными технологиями РГ в промышленности являются [12]:

- ТЭЦ для средних и крупных предприятий;
- модульные автоматизированные мини-ТЭЦ для небольших предприятий;

- установки использования возобновляемых источников энергии, производящих только электрическую энергию (геотермальные установки, малые ГЭС и др.).

Применение тех или иных технологий на промышленных предприятиях определяется:

- особенностям нагрузки и интегрирования в производственные технологические процессы конкретного потребителя;
- наличием побочных продуктов производства, которые можно использовать в качестве энергоносителя и/или недорогих видов топлива;
- соотношением цен на электрическую энергию и топливо;
- размером платы за присоединение к электрическим сетям и тарифа на передачу электрической энергии;
- иных условий, учитывающих специфику каждого отдельного потребителя.

Транспорт. Согласно [13,14] установки РГ используются для обеспечения тяги поездов и нужд нетяговых железнодорожных потребителей. Особую сферу применения установок РГ образуют системы гарантированного электроснабжения устройств сигнализации, централизации и автоблокировки, обеспечивающие повышение безопасности движения поездов. Установки РГ могут объединяться в микроэнергосистемы, построенные, как правило, на базе НВИЭ и предназначенные для электроснабжения территориально обособленных объектов железнодорожного транспорта.

Для аэропортов требуется высочайший уровень надежности электроснабжения. Они являются идеальным приложением для технологии тригенерации – одновременного производства электроэнергии, тепла и холода. Собственную генерацию уже имеют аэропорты Мюнхена, Дюссельдорфа, Рима, Милана, Лос-Анджелеса, Калгари и др. [15].

Согласно [16] парк электромобилей в мире в 2020 году составил 10 миллионов единиц (1% от общего количества автомобилей), что на 43% больше, чем в 2019 году. В контексте развития РГ речь идет о технологии сетевого хранения электроэнергии в аккумуляторах электромобилей и гибридных электромобилей, подключенных к общей сети, иначе называемой концепцией динамической зарядки – Vehicle-to-grid (V2G) [17]. Предполагается, что у владельцев автомобилей с технологией V2G будет возможность продавать электроэнергию в энергосистему в часы, когда машина не используется, заряжать автомобиль в часы, когда электроэнергия дешевле, подключать автомобили к собственному дому и использовать их в качестве бесперебойного питания для дома или офиса. Таким образом, V2G-технология может создать дополнительный источник энергии. **Владельцы автопарков смогут поставлять электроэнергию в сеть, а накопленная энергия может быть использована в случае отключения электроэнергии, повышая надежность энергоснабжения.** Уже сегодня V2G-технология широко развивается правительством США и компанией Google [18].

Непроизводственная сфера. В настоящее время распределенная энергогенерация востребована в удаленных населенных пунктах, объектах, не имеющих доступа к централизованному энергоснабжению, а также в медицинских организациях, банках, санаториях, горнолыжных курортах, небоскребах, крупных торговых, деловых и выставочных центрах, отелях, ЦОДах² и других объектах, где очень значимо бесперебойное непрерывное надежное энергообеспечение.

На выбор тех или иных технологий РГ оказывает влияние большое количество факторов:

- типы поселений – мегаполисы, малые города, сельская местность;

² центры обработки данных

- здания по типу использования – жилое, коммерческое, средняя площадь крыши на единицу площади и пр.;
- здания по году постройки – новое или существующее;
- возможности энергоснабжения территории – наличие газопроводов, централизованного электроснабжения, тарифы на электроэнергию, стоимость топлива и пр.;
- климатические особенности территории – солнечная инсоляция, средняя скорость ветра, количество градусо-дней отопительного периода и пр.

В жилом секторе, как правило, используются только солнечные фотоэлектрические панели, небольшие ветрогенераторы и топливные элементы. В коммерческом этот набор значительно шире (табл.1) [19].

Таблица 1. Технологии распределенной генерации, применяемые в секторах непромышленной сферы

Виды ресурсов	Жилой сектор	Коммерческий сектор
Возобновляемые	Солнечные фотоэлектрические (PV) Ветрогенераторы	Солнечные фотоэлектрические (PV) Ветрогенераторы Гидроэлектростанции Древесина Твердые бытовые отходы
Невозобновляемые	Топливные элементы на природном газе	Топливные элементы на природном газе Поршневые двигатели на природном газе Турбины на природном газе Микротурбины на природном газе Дизельные поршневые двигатели Каменный уголь

3. Обзор литературы. Исследования разных аспектов развития распределенной генерации стало актуальной проблемой в последние годы. В [20-25] рассмотрены основные преимущества, общесистемные эффекты и проблемы технологического присоединения распределенных источников энергии в распределительные сети. В [26-28] описаны вопросы функционирования электрических сетей с РГ, в том числе, проблемы релейной защиты, почасовой загрузки, качества электроэнергии устройств распределенной генерации [29-32]. В [33-35] представлены исследования режимной надежности систем электроснабжения с распределенной генерацией и учетом каскадных отказов, модели для определения предельных режимов в электрических сетях, а также методы для оценки параметров режима энергорайонов с объектами распределенной генерации. Во многих работах уделяется внимание оценке надежности систем энергоснабжения [36, 37], в том числе оценке возможности обеспечения надежного электроснабжения потребителей за счет строительства объектов распределенной генерации [38-41]. Кроме того, распределенная генерация энергии рассматривается как один из факторов повышения энергетической безопасности и устойчивого развития регионов [42-44]. Несмотря на значительное количество публикаций, освещающих разные аспекты применения распределенной генерации, не удалось найти

работ, связанных с оценкой ее влияния на спрос на электроэнергию, цену и структуру ее производства в регионе.

4. Предлагаемый методический подход. В ИСЭМ СО РАН разработан и постоянно совершенствуется поэтапный методический подход к повышению обоснованности долгосрочных прогнозов развития ТЭК страны. Этот подход предполагает существование разных по значимости и сложности задач и способов их решения на разных временных стадиях прогнозного периода [2, 45]. Для исследований создан методический инструментарий, который представляет собой стенд (набор) разного вида моделей (оптимизационных, имитационных, балансовых, регрессионных и т.д.) с разной степенью агрегирования продуктов, объектов и территории [1, 46]. Модели не связаны между собой автоматическими процедурами, это позволяет решать как отдельные задачи, для которых и разрабатывались эти модели, так и составлять из них расчетные комплексы. В этом случае результаты решения одних моделей используются как исходная информация для других. При возникновении новых задач стенд дополняется новыми моделями либо модификациями уже существующих.

Одной из новых задач, возникающих с переходом энергетики на траекторию интеллектуального развития, является прогнозная оценка возможного влияния масштабов распределенной генерации на перспективный спрос на электроэнергию, структуру и стоимость ее производства в регионе. Решение подобной задачи требует учета специфики развития региональной энергетики и экономики, подробного рассмотрения территории, особенностей потребителей, графиков их электрических нагрузок и т.д. Все это множество параметров характеризуется большой неопределенностью будущих значений и обуславливает целесообразность использования метода Монте-Карло. Подход, основанный на сочетании методов оптимизации и Монте-Карло, уже применяется в одной из моделей стенда – модели МИСС-ЭЛ [47]. Эта модель предназначена для определения рациональной структуры новых электростанций (с оценкой и учетом инвестиционных рисков) и вероятной стоимости производства электроэнергии в макрорегионах (федеральных округах и/или объединенных энергосистемах) на перспективу до 15 лет.

Методические принципы и результаты исследований на модели МИСС-ЭЛ предлагается использовать как источник прогнозной информации об условиях развития систем электроснабжения и как основу для разработки нового инструментария. В отличие от модели МИСС-ЭЛ новая модель региональной энергосистемы – МИСС-РЭС должна более детально описывать территорию, условия и возможности развития РГ. Установки РГ, как правило, являются составной частью потребителей, поэтому необходимо рассматривать разнообразие возможностей поведения и способов собственной генерации у разных групп потребителей в регионе. Для этого разрабатывается специальная модель региональной системы энергопотребления в которой потребители (j) описываются как можно подробнее: объемы (W_j) и графики потребления электроэнергии, наличие и перспективы установки мощностей РГ (N_j), технико-экономические параметры установок, величина (ΔW_j) возможного производства электроэнергии установками РГ и т.д. Схема предлагаемого подхода и основных взаимосвязей моделей представлена на рисунке.

В модели МИСС-РЭС величина и структура централизованного производства электроэнергии, полученные при исследовании рассматриваемого варианта развития макрорегиона (результаты решения на модели МИСС-ЭЛ), детализируются по территории рассматриваемой РЭС (по районам, городам и т.д.), а РГ представляется в виде дополнительного источника производства электроэнергии (виртуальная электростанция). Функционал такой модели состоит из: затрат на производство электроэнергии централизованными источниками (информация, поступающая из модели МИСС-ЭЛ), затрат

на производство электроэнергии установками РГ (информация из модели регионального энергопотребления) и тарифа на передачу электроэнергии от централизованных и распределенных источников:

$$F = \sum_r \sum_e c_{er} N_{er} h_{er} + \sum_r \sum_j c_{jr} N_{jr} h_{jr} + \sum_e \sum_j T_{ej} W_{ej} \rightarrow \min$$

где c_{er} – приведенные затраты на выработку электроэнергии на станции типа e (цент/кВтч) на территории r , N_{er} – установленная мощность на электростанции типа e (кВт) на территории r , h_{er} – число часов использования установленной мощности на электростанции типа e (час) на территории r , c_{jr} – приведенные затраты на выработку электроэнергии установкой РГ типа j (цент/кВтч) на территории r , N_{jr} – установленная мощность установки РГ типа j (кВт) на территории r , h_{jr} – число часов использования установленной мощности установки РГ типа j (час), T_{ej} – тариф на передачу электроэнергии от электростанции типа e и установки РГ типа j (цент/кВтч), W_{ej} – объем передачи электроэнергии от электростанции типа e и установки РГ типа j (кВтч).

Основными ограничениями в модели МИСС-РЭС являются:

- возможный потенциал развития установок РГ типа j $0 \leq N_j \leq \overline{N}_j$,
- возможный ввод новых электростанций типа e $\underline{N}_e \leq N_e \leq \overline{N}_e$,
- прогнозный уровень электропотребления $\underline{W} \leq W \leq \overline{W}$, где

$$W = \sum_e N_e h_e + \sum_j N_j h_j$$

Значения цен на энергоносители, технико-экономических параметров установок и ограничений представляются диапазонами их перспективных значений с возможностью задания вида распределения вероятности в этих диапазонах (нормальное, равномерное, показательное и т.д.). Ранее выполненные исследования [46] показали значительную дифференциацию стоимости производства электроэнергии по регионам и ее зависимость от качества используемой информации (от вида распределения вероятности в интервалах принимаемых значений исходных данных) (рис. 1).

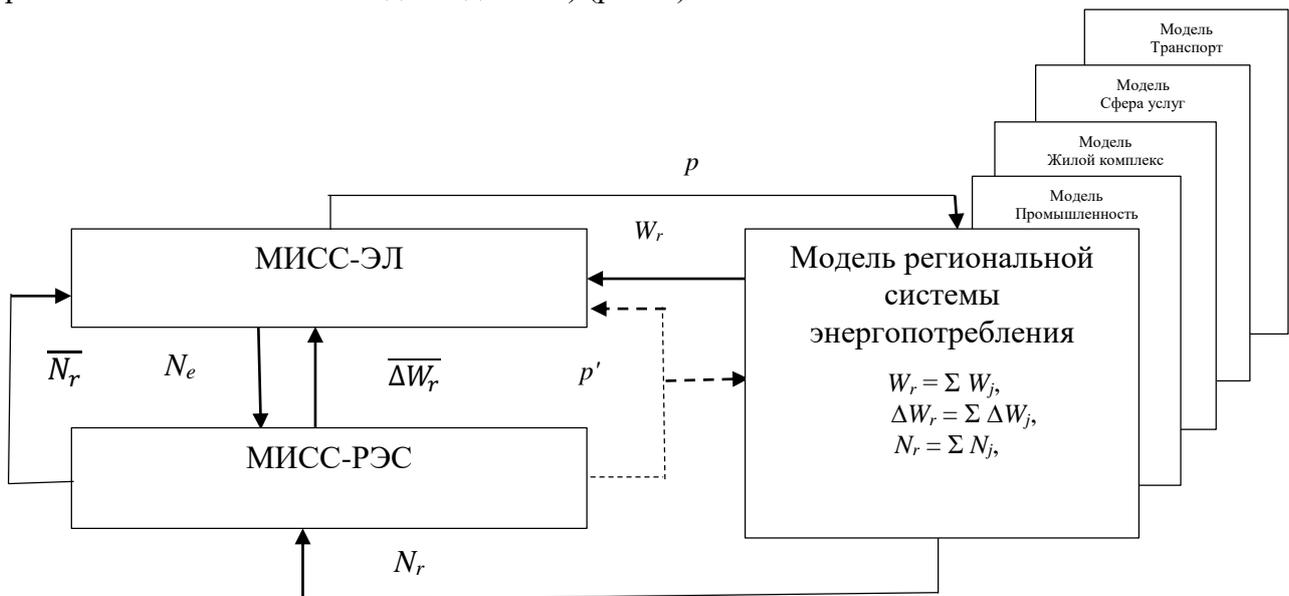


Рис. 1. Принципиальная схема предлагаемого подхода к оценке влияния развития РГ на перспективы региональной системы энергоснабжения (источник: разработка автора)

Наиболее сложным в решении рассматриваемой задачи является разработка модели региональной системы энергопотребления. Модель должна состоять из подмоделей разных секторов экономики, в каждой из которых определяются уровни потребления электроэнергии, возможные величины снижения потребности, прогнозируемые масштабы применения установок РГ.

В общем случае объемы потребления электроэнергии (кВтч) в промышленности могут быть рассчитаны по формуле:

$$W_{\text{пр}} = \sum_i V_{i \text{ нп}} e_{i \text{ нп}} - \beta \left(\sum_i V_{i \text{ нп}} e_{i \text{ нп}} \right) + \left(\sum_j V_{j \text{ нп}} e_{j \text{ нп}} \right) \beta \gamma \alpha$$

где $V_{\text{нп } i}$ и $V_{\text{нп } j}$ – объемы производства продукции предприятий отраслей непрерывного i и прочего j производства соответственно; $e_{\text{нп } i}$ и $e_{\text{нп } j}$ – энергоемкость производства продукции предприятий отраслей непрерывного i и прочего j производства соответственно; β – коэффициент возможного снижения электропотребления за счет энергосбережения; γ – коэффициент возможного снижения электропотребления за счет управления режимами работы оборудования; α – коэффициент возможного снижения электропотребления за счет обмена на финансовые стимулы.

Объемы потребления электроэнергии (кВтч) в жилом и коммерческом секторах региона рассчитываются по формулам:

$$W_{\text{ж}} = \beta \gamma \alpha S_{\text{ж}} e_{\text{осв ж}} + \gamma \alpha \text{Ч} \sum_l k_l e_{l \text{ при б ж}}$$

$$W_{\text{к}} = \beta \gamma \alpha S_{\text{к}} e_{\text{осв к}} + \beta \gamma \alpha S_{\text{к}} e_{\text{при б к}}$$

где $S_{\text{ж}}$ и $S_{\text{к}}$ – площадь жилья и площадь коммерческих зданий соответственно; $e_{\text{осв ж}}$, $e_{\text{осв к}}$ – удельный расход электроэнергии на освещение в жилых и коммерческих зданиях соответственно; Ч – численность населения; k_l – обеспеченность населения прибором вида l ; $e_{l \text{ при б ж}}$ – удельный расход электроэнергии прибором типа l ; $e_{\text{при б к}}$ – средний удельный расход электроэнергии приборами и механизмами в коммерческом секторе.

Объемы потребления электроэнергии (кВтч) на транспорте определяются как

$$W_{\text{т}} = \partial \text{Ч} k_a e_a d_a + K_o e_o d_o$$

где ∂ – доля электромобилей в общей численности личных автомобилей, k_a – обеспеченность населения региона автомобилями, e_a – среднее потребление электроэнергии на 1 км пробега электромобиля, d_a – средний годовой пробег электромобиля, K_o – количество единиц общественного электротранспорта в регионе, e_o – среднее потребление электроэнергии на 1 км пробега общественного электротранспорта, d_o – средняя величина пробега общественного электротранспорта в регионе.

Для расчета возможных объемов производства электроэнергии установками РГ анализируется: в каком секторе экономики (жилом, коммерческом, промышленном) существуют (планируются) установки, их возможные мощности генерации, в какой части графика электрической нагрузки они могут принимать участие. Удельные капитальные и эксплуатационные затраты определяются для каждого сектора отдельно с учетом их зависимости от масштаба развития РГ.

В промышленности выбор установок определяется доступным на территории топливом, соотношением прогнозных электрических и тепловых нагрузок предприятия, его технологическими особенностями (например, потребностью в отборе пара) и другими условиями. Критерием выбора той или иной технологии принимается минимальный дисконтированный срок окупаемости:

$$T_{\text{ок}} = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \geq K_0$$

где $T_{\text{ок}}$ – дисконтированный срок окупаемости инвестиций, n – срок реализации проекта, K_0 – первоначальные капитальные вложения в установку, CF_t – денежный поток в течение времени t , r – коэффициент дисконтирования.

В коммерческом секторе оцениваются затраты на основе внутренней нормы доходности (ВНД, IRR), используя 30-летний анализ денежных потоков (ЧДД), чтобы определить период окупаемости для различных технологий РГ.

$$\text{ЧДД} = -K_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+\text{ВНД})^t} = 0$$

В жилом секторе оцениваются затраты на установку РГ (после вычета всех стимулов и компенсаций) и количество лет, когда чистый совокупный денежный поток становится положительным относительно покупки электроэнергии в энергосистеме

$$\text{ЧДД} > C_3 W$$

где C_3 – стоимость электроэнергии в энергосистеме, W – объем потребления электроэнергии.

На транспорте используются мировые тенденции распространения личных электромобилей и общественного электрического транспорта с учетом российских особенностей.

Исследование предполагает следующую последовательность:

1. Модель МИСС-ЭЛ настраивается на рассматриваемый сценарий развития экономики и ТЭК. Использование метода Монте-Карло позволяет определить множество сбалансированных решений при разном сочетании характеристик будущих условий. Из этого множества формируется вариант структуры производства электроэнергии (N_e) в ОЭС с минимальной ее стоимостью (p) в принятых условиях. Полученные результаты являются исходной информацией для модели МИСС-РЭС.

2. В модели МИСС-РЭС вводимые новые мощности детализируются по территории рассматриваемого региона и дополняются мощностями РГ разных категорий потребителей (N_{jr}). Последнее определяется в модели региональной системы энергопотребления во взаимосвязи с полученной на МИСС-ЭЛ стоимостью производства электроэнергии (p).

3. Расчеты на модели МИСС-РЭС уточняют стоимость производства электроэнергии (p') в рассматриваемом регионе с учетом его особенностей, позволяют определить потенциал замещения мощностями РГ (\bar{N}_j – верхнюю границу мощностей РГ) централизованно вводимые мощности (N_e) и максимальный объем производства электроэнергии ($\overline{\Delta W}$) на мощностях РГ.

4. На основе многовариантных расчетов (разных сценариев развития РГ³) строятся зависимости цен и спроса на электроэнергию от масштабов развития РГ в регионе.

Результаты расчетов на модели МИСС-РЭС в виде снижения спроса на электроэнергию на величину ($\overline{\Delta W}$) в рассматриваемом регионе могут быть использованы для уточнения и оценки возможного изменения структуры и стоимости производства электроэнергии в исследованиях на модели МИСС-ЭЛ.

Заключение. Развитие распределенной энергетики является ведущим мировым трендом, способствующим переходу от традиционной однонаправленной организации энергосистем к новым интегрированным и гибридным их видам, сочетающим крупные централизованные и распределенные источники энергии. В связи с этим, одной из

³ Сценарии проникновения (распространения) разного вида технологий РГ основываются на анализе мировых тенденций [48,49]

новых задач, возникающих при долгосрочных исследованиях эффективных вариантов развития электроэнергетики и ТЭК, является оценка влияния масштабов распространения РГ на структуру производства, стоимость и спрос на электроэнергию в регионе.

Предлагаемый для решения этой задачи методический подход и инструментарий, базирующийся на сочетании методов оптимизации и Монте-Карло, позволяет проводить многовариантные расчеты с учетом качества имеющейся информации и оценить изменение стоимости электроэнергии и ее спрос при разных вариантах развития РГ в регионе.

Безусловно, подобная оценка является приблизительной, однако она может дать представление о том, в какой степени РГ может повлиять на развитие региональных систем энергоснабжения, что будет способствовать повышению обоснованности прогнозов развития электроэнергетики и ТЭК.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0003 рег. № АААА-А21-121012090014-5) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. и частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-010-00204.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперова Е.В., Кононов Д.Ю. Методы и модели прогнозных взаимосвязей энергетики и экономики. Новосибирск: Наука. 2009. 178 с.
2. Кононов Ю.Д. Пути повышения обоснованности долгосрочных прогнозов развития ТЭК. Новосибирск: Наука. 2015. 147 с.
3. Системные исследования в энергетике: методология и результаты / Под ред. А.А. Макарова и Н.И. Воропая. М.: ИНЭИ РАН. 2018. 309 с.
4. Макаров А.А. Полвека системных исследований развития энергетики СССР и России – а что далее? // Теплоэнергетика. №12. 2020. С. 5-14.
5. Hansen C.J., Bower J. An economic evaluation of small-scale distributed electricity generation technologies. Oxford Institute for Energy Studies & Dept. of Geography, Oxford University. 2004. 59 p.
6. Bauen A., Hawkes A. Decentralised generation – technologies and market perspectives. IEA. Paris. 2004. 18 p.
7. Decentralised generation technologies: potentials, success factors and impacts in the liberalized EU energy markets. Final report, DECENT. October 2002. 234 p.
8. Батенин В.М., Бушуев В.В., Воропай Н.И. Инновационная электроэнергетика-21 М.: ИЦ «Энергия». 2017. 584 с.
9. Navigant Research. Global DER Deployment Forecast Database. 4Q. 2017.
10. Распределенная энергетика в России: потенциал развития. Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО. 89 с. Режим доступа: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DE R-3.0_2018.02.01.pdf (дата обращения: 03.02.2021).
11. Корпоративное напряжение. Распределенная генерация. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/4877604> (дата обращения: 30.08.2021).
12. Возможности инвестирования в промышленную распределённую генерацию в России. Подготовлено для Европейского банка реконструкции и развития компанией ÅF-Consult Ltd. Итоговый отчет 8POLSUF 14.06.2013 г. Режим доступа: https://www.npace.ru/media/presentations_documents/8POLSUF_summary_report_13082013_final_rus_corr.pdf (дата обращения: 30.08.2021).

13. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Арсентьев М.О. Использование технологий распределенной генерации на железнодорожном транспорте // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 3(19) 2008, С. 81-87.
14. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Черепанов А.В., Нгуен Ван Хуан. Моделирование и управление в технических системах // Системы, Методы, Технологии. 2020 № 3 (47) с. 43–49. DOI:10.18324/2077-5415-2020-3-43-49.
15. Собственная генерация для аэропортов. Режим доступа: <https://vvp-e.ru> (дата обращения: 31.08.2021).
16. Global EV Outlook 2021. IEA. Available at: www.iea.org (дата обращения: 5.10.2021).
17. Vehicle-to-grid (V2G): Технология сетевого хранения электроэнергии в аккумуляторах электромобилей. Режим доступа: <http://renewnews.ru/market/energy-storage/v2g/> (дата обращения: 6.10.2021).
18. Vehicle to Grid (V2G) Technology. Available at: <https://innovationatwork.ieee.org/vehicle-to-grid-v2g-technology/> (дата обращения: 6.10.2021).
19. Modeling Distributed Generation in the Buildings Sectors. 2017. Independent Statistics & Analysis. U.S. Department of Energy. Washington, DC 20585. Available at: www.eia.gov (дата обращения: 5.10.2021).
20. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: монография / Ю.Е. Гуревич, П.В. Илюшин. Н.Новгород: НИУ РАНХиГС. 2018. 280 с.
21. Илюшин П.В. Перспективы применения и проблемные вопросы интеграции распределенных источников энергии в электрические сети: монография. М.: НТФ «Энергопрогресс». 2020. 116 с. DOI: 10.34831/EP.2020.260.8.001.
22. Mehigan L., Deane J.P., Gallachoir B.P.O., Bertsch V. A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems // Energy 163 (2018) 822-836.
23. Mateo C., Frías P., Tapia-Ahumada K. A comprehensive techno-economic assessment of the impact of natural gas-fueled distributed generation in European electricity distribution networks // Energy 192 (2020) 116523.
24. Matosa S.P.S., Vargas M.C., Fracalossi L.G.V., Encarnaçao L.F., Batista O.E. Protection philosophy for distribution grids with high penetration of distributed generation// Electric Power Systems Research 196 (2021) 107203.
25. Ali Ehsan, Qiang Yang. Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques // Applied Energy 210 (2018) 44-59.
26. Косарев Б.А., Кошук Г.А., Федоров В.К., Лысенко О.А. Оптимизация функционирования электротехнической системы с распределенной генерацией //Актуальные вопросы энергетики. 2019. № 1. С. 99-103.
27. Горшкова Н.А., Гуревич Ю.Е., Илюшин П.В. Перспективные направления в автоматизации объектов распределенной генерации при их интеграции в распределительные сети // Релейная защита и автоматизация. 2013. № 1 (10). С. 48-55.
28. Chenjie Маа, Johannes Dasenbrocka, J.-Christian Töbermanna, Martin Braun. A novel indicator for evaluation of the impact of distributed generations on the energy losses of low voltage distribution grids // Applied Energy 242 (2019) 674-683.
29. Шарыгин М.В., Куликов А.Л., Вуколов В.Ю., Петров А.А. Адаптивная релейная защита электрических сетей с источниками распределенной генерации // Изв. РАН. Энергетика. 2020. № 3. С. 60-68 DOI: 10.31857/S000233102003005X.
30. Кирпиков А.В., Кирпикова И.Л., Обоскалов В.П. Стратегии загрузки устройств распределенной генерации в течение суток // Промышленная энергетика. 2014. № 4. С. 12-15.

31. Солнцев Е.Б., Мамонов А.М., Фитасов А.Н., Петрицкий С.А., Севостьянов А.А. Анализ качества электроэнергии (колебаний напряжения) при распределенной генерации // Энергобезопасность и энергосбережение. 2019. № 3. С. 37-40.
32. Гулиев Г.Б., Рахманов Н.Р. Регулятор нечеткой логики для управления реактивной мощностью и напряжением в сетях распределенной генерации // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2014. № 2. С. 47-52.
33. Фам Ч.Ш., Воропай Н.И. Исследование режимной надежности систем электроснабжения с распределенной генерацией и учетом каскадных отказов // Электричество. 2013. № 12. С. 14-20.
34. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Черепанов А.В. Математические модели для определения предельных режимов в электрических сетях с установками распределенной генерации // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2020. № 4 (80). С. 17-36.
35. Куликов А.Л., Илюшин П.В., Пелевин П.С. Применение дискриминаторных методов для оценки параметров режима энергорайонов с объектами распределенной генерации // Электричество. 2019. № 7. С. 22-35.
36. Папков Б.В., Осокин В.Л. Особенности оценки структурной надежности систем с объектами распределенной генерации // Известия РАН. Энергетика. 2020. № 2. С. 75-84 DOI: 10.31857/S0002331020020090.
37. Некрасов С.А. Повышение надежности и доступности энергоснабжения российских городов на основе распределенной генерации // НРЭ № 9 (2012 г.) С.15-25.
38. Илюшин П.В., Кучеров Ю.Н. Подходы к оценке возможности обеспечения надежного электроснабжения потребителей за счет строительства объектов распределенной генерации // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2014. № 5. С. 2-7.
39. Чечушков Д.А., Паниковская Т.Ю., Бунькова Е.А. Метод оптимального размещения источников распределенной генерации для повышения надежности электроснабжения // Промышленная энергетика. 2014. № 9. С. 17-21.
40. Варганова А.В., Байрамгулова Ю.М., Гончарова И.Н., Кроткова О.А. Техно-экономическое обоснование места установки источников распределенной генерации // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 3 (44). С. 68-72.
41. Surender Singh Tanwara, D.K. Khatod. Techno-economic and environmental approach for optimal placement and sizing of renewable DGs in distribution system // Applied Energy 127 (2017) 52-67.
42. Моисеев Л.Л., Сливной В.Н. Распределенная генерация энергии - фактор повышения энергетической безопасности региона // Ползуновский вестник. 2004. № 1. С. 226-229.
43. Майоров С. Распределенная автономная генерация как основа энергобезопасности // Энергонадзор. 2016. № 5 (81). с. 8.
44. Филиппов С.П., Дильман М.Д., Илюшин П.В. Распределенная генерация и устойчивое развитие регионов // Теплоэнергетика. 2019. № 12. С. 4-17.
45. Гальперова Е.В. Методология исследования долгосрочной динамики спроса на энергоносители для повышения обоснованности перспектив развития ТЭК: состав задач, методы и модели // Известия РАН. Энергетика. 2021. № 1. С. 101-108. DOI: 10.31857/S0002331021010064.
46. Гальперова Е.В. Использование стенда моделей для долгосрочного прогнозирования рыночного спроса на энергоносители // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. № 4-2. С. 17-27.

47. Кононов Ю.Д., Кононов Д.Ю. Экономическая составляющая энергетической безопасности и методические подходы к ее оценке // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2019. Т.5. №6. С. 1086-1096. DOI: 10.24891/ni.15.6.1086.
48. Distributed Generation and Combined Heat & Power System Characteristics and Costs in the Buildings Sector. Режим доступа: <https://www.eia.gov> (дата обращения: 29.09.2021).
49. Modeling Distributed Generation in the Buildings Sectors. Режим доступа: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/2020/buildings/> (дата обращения: 29.09.2021).

UDK 338.27:51-74

METHOD AND MODELS FOR ESTIMATING THE INFLUENCE OF DISTRIBUTED GENERATION DEVELOPMENT ON ELECTRICITY DEMAND AND PRICE IN A REGION

Elena V. Galperova

Ph.D., Associate Professor, Senior Researcher, e-mail: galper@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS

664033, Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.

Abstract. The relevance of the article is due to the transition of energy to the path of intellectual development. One of the characteristics of this transition is the broadening of the prospects for decentralized electricity generation. Under the new conditions, a consumer has the opportunity to change his energy consumption depending on the cost of energy resources, to have his own installations for the production and / or storage of electricity. The article briefly presents the features of the use and technology of distributed generation (DG) energy in certain sectors of the economy (industry, residential and commercial sectors, transport). Some methods of determining the prospective values of the power of the RG at consumers are given. An approach to modeling and assessing the impact of the scale of distributed generation on the long-term development of regional power supply systems is proposed. A distinctive feature of the approach is the use of the previously developed stochastic optimization model of the unified power system of the macroregion as a basis for the development of its regional modification and a source of forecast information on the conditions for the development of the regional power system. Of course, the proposed approach gives only a rough estimate, but it allows us to outline a promising range of changes in the cost and demand for electricity in the region under different options for the development of the RG.

Keywords: forecasting, distributed generation, consumers, energy carriers, demand, fuel and energy complex, electricity, Monte Carlo, optimization, uncertainty.

Acknowledgements: The research was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0003) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030 (reg. number AAAA-A21-121012090014-5), some results were obtained with partial funded by RFBR project number 20-010-00204.

REFERENCES

1. Metody i modeli prognoznyh vzaimosvyazey energetiki i ekonomiki / Yu.D. Kononov, E.V. Galperova, D.Yu. Kononov i dr. [Methods and models for projections of energy-economy interactions] – Novosibirsk: Nauka = Science. 2009. 178 p. (in Russian)
2. Kononov Yu.D. Puti povysheniya obosnovannosti dolgosrochnykh prognozov razvitiya TEK [Approaches to improve the validity of long-term projections of the energy sector]. Novosibirsk: Nauka = Science. 2015. 147 p. (in Russian)
3. Sistemnye issledovaniya v energetike: metodologiya i rezul'taty /Pod red. A.A. Makarova i N.I. Voropaya [Energy systems analysis: methodology and research findings]. M.: INEI RAN. 2018. 309 p. (in Russian)

4. Makarov A.A. Polveka sistemnyh issledovaniy razvitiya energetiki SSSR i Rossii – a chto dalee? (obzor) [Half a century of systems studies into developing the power industry in the Soviet Union and Russia: what next? (review)] // *Teploenergetika = Thermal Engineering*. №12. 2020. Pp. 5-14. (in Russian)
5. Hansen C.J., Bower J. An economic evaluation of small-scale distributed electricity generation technologies. Oxford Institute for Energy Studies & Dept. of Geography, Oxford University, 2004. 59 p.
6. Bauen A., Hawkes A. Decentralised generation – technologies and market perspectives. IEA, Paris. 2004. 18 p.
7. Decentralised generation technologies: potentials, success factors and impacts in the liberalized EU energy markets. Final report, DECENT. October 2002. 234 p.
8. Innovacionnaya elektroenergetika-21/pod red. V.M. Batenina, V.V. Bushueva, N.I. Voropaya – M.: IC «Energiya», [The innovation-driven electric power sector-21] 2017. 584 p. (in Russian)
9. Navigant Research. Global DER Deployment Forecast Database, 4Q 2017.
10. Raspredeleonnaya energetika v Rossii: potencial razvitiya. Energeticheskij centr Moskovskoj shkoly upravleniya SKOLKOVO, 89 p. [Distributed energy in Russia: Potential for development]. Available at: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DER-3.0_2018.02.01.pdf (accessed: 03.02.2021) (in Russian)
11. Korporativnoe napryazhenie. Raspredeleonnaya generaciya. [Corporate tension. Distributed generation.] [Online]. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/4877604> (accessed 30.08.2021) (in Russian)
12. Vozmozhnosti investirovaniya v promyshlennuyu raspredelyonnuyu generaciyu v Rossii. Podgotovleno dlya Evropejskogo banka rekonstrukcii i razvitiya kompaniej ÅF-Consult Ltd. Itogovyj otchet 8POLSUF 14.06.2013 [Investment opportunities in industrial distributed generation in Russia. Prepared for the European Bank for Reconstruction and Development by ÅF-Consult Ltd. Final report]. Available at: https://www.np-ace.ru/media/presentations_documents/8POLSUF_summary_report_13082013_final_rus_corr.pdf (accessed 30.08.2021) (in Russian)
13. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Arsent'ev M.O. Ispol'zovanie tekhnologij raspredelennoj generacii na zheleznodorozhnom transporte [The use of distributed generation technologies in railway transport] // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. № 3(19) 2008. Pp. 81-87 (in Russian)
14. Bulatov YU.N., Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Nguen Van Huan. Modelirovanie i upravlenie v tekhnicheskikh sistemah [Modeling and control in technical systems] // *Sistemy, Metody, Tekhnologii = Systems, Methods, Technologies*. 2020. № 3 (47). Pp. 43-49. DOI:10.18324/2077-5415-2020-3-43-49 (in Russian)
15. Sobstvennaya generaciya dlya aeroportov [Own generation for airports]. Available at: <https://vvp-e.ru> (accessed 31.08.2021) (in Russian)
16. Global EV Outlook 2021. IEA. Available at: www.iea.org (accessed 5.10.2021).
17. Vehicle-to-grid (V2G): Tekhnologiya setevogo hraneniya elektroenergii v akkumulyatorah elektromobilej [Vehicle-to-grid (V2G): Networked storage technology for electric vehicle batteries] Available at: <http://renewnews.ru/market/energy-storage/v2g/> (accessed 6.10.2021) (in Russian)
18. Vehicle to Grid (V2G) Technology. Available at: <https://innovationatwork.ieee.org/vehicle-to-grid-v2g-technology/> (accessed 6.10.2021).

19. Modeling Distributed Generation in the Buildings Sectors. 2017. Independent Statistics & Analysis. U.S. Department of Energy. Washington, DC 20585. Available at: www.eia.gov. (accessed 5.10.2021).
20. Osobennosti raschetov rezhimov v energorajonah s raspredelennoj generaciej: monografiya / Yu.E. Gurevich, P.V. Ilyushin [Special aspects of calculations of operation modes in the energy service area with distributed generation: a research monograph]. N.Novgorod: NIU RANHiGS, 2018. 280 p. (in Russian)
21. Ilyushin P.V. Perspektivy primeneniya i problemnye voprosy integracii raspredelennyh istochnikov energii v elektricheskie seti: monografiya [Prospects of application and outstanding issues of Integration of distributed energy sources into power grids: a research monograph]. M.: NTF «Energoprogress». 2020. 116 p. DOI: 10.34831/EP.2020.260.8.001 (in Russian)
22. Mehigan L., Deane J.P., Gallachoir B.P.O., Bertsch V. A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems // *Energy* 163 (2018) 822-836.
23. Mateo C., Frías P., Tapia-Ahumada K. A comprehensive techno-economic assessment of the impact of natural gas-fueled distributed generation in European electricity distribution networks // *Energy* 192 (2020) 116523.
24. Matosa S.P.S., Vargas M.C., Fracalossi L.G.V., Encarnaç~ao L.F., Batista O.E. Protection philosophy for distribution grids with high penetration of distributed generation // *Electric Power Systems Research* 196 (2021) 107203.
25. Ali Ehsan, Qiang Yang. Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques // *Applied Energy* 210 (2018) 44-59.
26. Kosarev B.A., Koshchuk G.A., Fedorov V.K., Lysenko O.A. Optimizaciya funkcionirovaniya elektrotekhnicheskoy sistemy s raspredelennoj generaciej [Optimization of the operation of the electrical engineering system with distributed generation] // *Aktual'nye voprosy energetiki = Topical issues of energy*. 2019. № 1. Pp. 99-103 (in Russian)
27. Gorshkova N.A., Gurevich Yu.E., Ilyushin P.V. Perspektivnye napravleniya v avtomatizacii ob"ektov raspredelennoj generacii pri ih integracii v raspredelitel'nye seti [Promising directions in the automation of distributed generation facilities during their integration into distribution networks] // *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya = Relay protection and automation*. 2013. № 1 (10). pp. 48-55 (in Russian)
28. Chenjie Maa, Johannes Dasenbrocka, J.-Christian Töbermanna, Martin Braun. A novel indicator for evaluation of the impact of distributed generations on the energy losses of low voltage distribution grids // *Applied Energy* 242 (2019) 674-683.
29. Sharygin M.V., Kulikov A.L., Vukolov V.Yu., Petrov A.A. Adaptivnaya relejnaya zashchita elektricheskikh setej s istochnikami raspredelennoj generacii [Adaptive power system protection for power grids with distributed generation sources] // *Izv. RAN. Energetika = Bulletin of RAS. Energy Series*. 2020. № 3. Pp. 60-68. DOI: 10.31857/S000233102003005X (in Russian)
30. Kirpikov A.V., Kirpikova I.L., Oboskalov V.P. Strategii zagruzki ustrojstv raspredelennoj generacii v techenie sutok [Loading strategies for distributed generation devices during the day] // *Promyshlennaya energetika = Industrial energy*. 2014. № 4. Pp. 12-15 (in Russian)
31. Solncev E.B., Mamonov A.M., Fitasov A.N., Petrickij S.A., Sevost'yanov A.A. Analiz kachestva elektroenergii (kolebanij napryazheniya) pri raspredelennoj generacii [Analysis of electric power quality (voltage fluctuations) in distributed generation] // *Energobezopasnost' i energosberezhenie = Energy security and energy saving*. 2019. № 3. Pp. 37-40 (in Russian)

32. Guliev G.B., Rahmanov N.R. Regulyator nechetkoj logiki dlya upravleniya reaktivnoj moshchnost'yu i napryazheniem v setyah raspredelennoj generacii [Fuzzy logic controller for reactive power and voltage control in distributed generation networks] // *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'* = *Electro. Electrical engineering, power engineering, electrical industry*. 2014. № 2. Pp. 47-52 (in Russian)
33. Fam Ch.Sh., Voropaj N.I. Issledovanie rezhimnoj nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya s raspredelennoj generaciej i uchetom kaskadnyh otkazov [The study of the operation mode reliability of electric power supply systems with distributed generation and cascading failures factored in] // *Elektrichestvo* = *Electricity*. 2013. № 12. Pp. 14-20 (in Russian)
34. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Matematicheskie modeli dlya opredeleniya predel'nyh rezhimov v elektricheskikh setyah s ustanovkami raspredelennoj generacii [Mathematical models for determining the limit operation modes in power grids with distributed generation installations] // *Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University*. 2020. № 4 (80). Pp. 17-36 (in Russian)
35. Kulikov A.L., Ilyushin P.V., Pelevin P.S. Primenenie diskriminatorynyh metodov dlya ocenki parametrov rezhima energorajonov s ob"ektami raspredelennoj generacii [Application of discriminatory methods for estimating operation mode parameters of energy service areas with distributed generation facilities] // *Elektrichestvo* = *Electricity*. 2019. № 7. Pp. 22-35 (in Russian)
36. Papkov B.V., Osokin V.L. Osobennosti ocenki strukturnoj nadezhnosti sistem s ob"ektami raspredelennoj generacii [Special aspects of the assessment of structural reliability of systems with distributed generation facilities] // *Izvestiya RAN. Energetika* = *Bulletin of RAS. Energy Series*. 2020. № 2. Pp. 75-84 DOI: 10.31857/S0002331020020090 (in Russian)
37. Nekrasov S.A. Povyshenie nadezhnosti i dostupnosti energosnabzheniya rossijskih gorodov na osnove raspredelennoj generacii [Improving the reliability and availability of power supply of Russian cities on the basis of distributed generation] // *NRE*. 2012. № 9. Pp. 15-25 (in Russian)
38. Ilyushin P.V., Kucherov Yu.N. Podhody k ocenke vozmozhnosti obespecheniya nadezhnogo elektrosnabzheniya potrebitelej za schet stroitel'stva ob"ektov raspredelennoj generacii [Approaches to assessment of the possibility of ensuring reliable electric power supply to consumers by means of construction of distributed generation facilities] // *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'* = *Electro. Electrical engineering, power engineering, electrical industry*. 2014. № 5. Pp. 2-7 (in Russian)
39. Chechushkov D.A., Panikovskaya T.Yu., Bun'kova E.A. Metod optimal'nogo razmeshcheniya istochnikov raspredelennoj generacii dlya povysheniya nadezhnosti elektrosnabzheniya [Method of optimal placement of distributed generation sources to improve the reliability of electricity supply] // *Promyshlennaya energetika* = *Industrial energy*. 2014. № 9. pp. 17-21 (in Russian)
40. Varganova A.V., Bajramgulova Yu.M., Goncharova I.N., Krotkova O.A. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie mesta ustanovki istochnikov raspredelennoj generacii [Feasibility study of the installation site of distributed generation sources] // *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* = *Electrical systems and complexes*. 2019. № 3 (44). Pp. 68-72 (in Russian)

41. Surender Singh Tanwara, D.K. Khatod. Techno-economic and environmental approach for optimal placement and sizing of renewable DGs in distribution system // *Applied Energy* 127 (2017) 52-67.
42. Moiseev L.L., Slivnoj V.N. Raspredeleonnaya generaciya energii - faktor povysheniya energeticheskoy bezopasnosti regiona [Distributed energy generation: a factor in increasing energy security of a region] // *Polzunovskij vestnik = Polzunovsky Bulletin*. 2004. № 1. Pp. 226-229 (in Russian)
43. Majorov S. Raspredeleonnaya avtonomnaya generaciya kak osnova energobezopasnosti [Distributed stand-alone generation as a basis for energy security] // *Energonadzor*. 2016. № 5 (81). p. 8 (in Russian)
44. Filippov S.P., Dil'man M.D., Ilyushin P.V. Raspredeleonnaya generaciya i ustojchivoe razvitie regionov [Distributed generation and sustainable development of regions] // *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2019. № 12. Pp. 4-17 (in Russian)
45. Galperova E.V. Metodologiya issledovaniya dolgosrochnoj dinamiki sprosa na energonositeli dlya povysheniya obosnovannosti perspektiv razvitiya TEK: sostav zadach, metody i modeli [Methodology for studying the long-term dynamics of demand for energy carriers with a view to improving the validity of energy sector development prospects: the set of tasks, methods, and models] // *Izvestiya RAN. Energetika = Bulletin of RAS. Energy Series*. 2021. № 1. Pp. 101-108. DOI: 10.31857/S0002331021010064 (in Russian)
46. Galperova E.V. Ispol'zovanie stenda modelej dlya dolgosrochnogo prognozirovaniya rynochnogo sprosa na energonositeli [Set of models for long-term forecasting of market energy demand] // *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management*. 2016. № 4-2. Pp. 17-27 (in Russian)
47. Kononov Yu.D., Kononov D.Yu. Ekonomicheskaya sostavlyayushchaya energeticheskoy bez-opasnosti i metodicheskie podhody k ee ocenke [The economic component of energy security and methodological approaches to its assessment] // *Nacional'nye interesy: priority i bezopasnost' = National Interests: Priorities and Security*. 2019. vol. 15. iss. 6. Pp. 1086-1096 DOI:10.24891/ni.15.6.1086 (in Russian)
48. Distributed Generation and Combined Heat & Power System Characteristics and Costs in the Buildings Sector. Available at: www.eia.gov (accessed 29.09.2021).
49. Modeling Distributed Generation in the Buildings Sectors. Available at: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/2020/buildings/> (accessed 29.09.2021).

Статья поступила в редакцию 17.09.2021; одобрена после рецензирования 08.10.2021; принята к публикации 18.10.2021.

The article was submitted 17.09.2021; approved after reviewing 08.10.2021; accepted for publication 18.10.2021.