

Математические и информационные технологии в энергетике

УДК 338.27:51-74

DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.001

Методология исследования и долгосрочного прогнозирования конъюнктуры на региональных энергетических рынках с учетом поведения потребителей: задачи, подходы, алгоритмы, модели

Гальперова Елена Васильевна

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

Россия, Иркутск, galper@isem.irk.ru

Аннотация. Актуальность статьи определяется важностью исследования взаимосвязи спроса и цен на региональных энергетических рынках для формирования долгосрочной динамики спроса на энергоносители, при выработке стратегических решений в области энергетической и экономической безопасности страны и регионов. Необходимость в разработке новых подходов для исследования долгосрочной конъюнктуры региональных энергетических рынков вызвана, в том числе, происходящим в мире очередным энергетическим переходом. Одной из главных особенностей перехода является появление у потребителей возможностей регулировать свое энергопотребление, иметь мощности по производству и хранению энергии, а также осуществлять взаимосвязь с энергосистемой. Эти новые свойства потребителей меняют саму систему энергоснабжения и ценообразование в энергетике.

В статье описан разработанный поэтапный методический подход, каждый его этап состоит в последовательном решении отдельной или нескольких задач разной степени важности и сложности, для каждой из которых разработаны свои методы и модели. Особенность подхода состоит в возможности (при необходимости) возвращаться на предыдущий этап для корректировки условий или показателей. Специфической чертой подхода является совместное взаимосвязанное рассмотрение системы потребления и энергоснабжения региона и итерационное согласование решений регионального уровня с системой энергоснабжения вышестоящего территориального уровня. Предлагаемая многоэтапная методология позволяет определить взаимное влияние спроса и цен на региональных энергетических рынках с учетом поведения потребителей и оценить региональную ценовую эластичность спроса на отдельные энергоресурсы, что позволит корректировать долгосрочную динамику спроса на энергоносители и будет способствовать повышению обоснованности перспективных вариантов развития электроэнергетики и ТЭК.

Ключевые слова: энергоносители, спрос, потребители, распределенная генерация, моделирование, система потребления, цена

Цитирование: Гальперова Е.В. Методология исследования и долгосрочного прогнозирования конъюнктуры на региональных энергетических рынках с учетом поведения потребителей: задачи, подходы, алгоритмы, модели / Гальперова Е.В. // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 5-18. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.001.

Введение. Исследование долгосрочной динамики потребности в топливно-энергетических ресурсах и влияния на нее их стоимости была и остается важной фундаментальной задачей при разработке и принятии стратегических решений в области энергетической и экономической безопасности страны и регионов и политики, направленной на повышение качества жизни населения.

Сложности в прогнозировании потребности в энергоносителях обусловлены необходимостью учета большого количества взаимосвязанных экономических, технических, социальных и поведенческих факторов, а также ростом неопределенности будущих условий развития энергетики, экономики и общества, в том числе, связанных с очередным энергопереходом. Важной особенностью энергоперехода является изменение роли потребителя, что повышает значимость исследований на региональном уровне, где происходит непосредственное согласование интересов производителей и потребителей энергии (цен и спроса). В условиях энер-

гетического перехода именно потребитель формирует объем и структуру используемых энергоносителей, которые, в свою очередь, определяют необходимые мощности по их производству в системе энергоснабжения. Активные потребители (имеющие возможность управлять своим энергопотреблением), а также потребители, имеющие собственные источники генерации (просьюмеры), создают новые условия конкуренции (в том числе и для традиционных поставщиков) и формирования спроса и цен на энергетических рынках.

В ИСЭМ СО РАН разработана методология исследования и прогнозирования спроса на энергоносители, которая постоянно развивается для решения новых возникающих проблем (см. подробнее [1]). Она предполагает существование разных по значимости и сложности задач и способов их решения на разных временных стадиях прогнозного периода. Формирование прогноза осуществляется последовательным сужением зоны неопределенности по двум направлениям: (1) во времени – от дальней перспективы к ближней, (2) по территории – от страны до субъекта федерации. В отличие, например, от применяемого в ИНЭИ РАН подхода [2] предусматривается возможность (необходимость) корректировки дальней перспективы по результатам решения ближней и вышестоящего территориального уровня на основе нижестоящего.

Реализующий методологию инструментарий представляет собой стенд моделей разного вида (оптимизационных, межотраслевых, имитационных) и степени агрегирования. Каждая модель может решать как свои специфические задачи, так и, при необходимости, объединяться с другими в расчетные комплексы (см. подробнее [3]).

1. Обзор литературы. В отечественной и зарубежной практике исследования и долгосрочного прогнозирования потребности в топливе и энергии накоплены и используются достаточно большое количество подходов, методов и моделей. Среди них как эвристические (Делфи, контрольных вопросов, мозгового штурма, аналогий и т.д.), так и математические (экстраполяции, оптимизации, балансов, имитации и др.) методы. Основной зарубежный опыт создания и применения отдельных методов и их комбинации проанализирован и обобщен в [4, 5], отечественные подходы достаточно полно представлены в [6-8]. Разработанные имитационные, оптимизационные, балансовые и др. модели используются как для исследования непосредственно перспективной динамики потребности в энергоресурсах, так и могут быть составной частью модельных комплексов, предназначенных для определения направлений развития энергетики [9-12].

В последние годы, в связи с появлением у потребителей новых возможностей, ведутся исследования по их влиянию на: снижение пиковых нагрузок и резервных мощностей, оптимизацию режимов работы электростанций и электроэнергетической сети, сокращение расходов и потерь топлива [13]. В [14] довольно полно описано изменение моделей и характера взаимодействия потребителей и энергокомпаний благодаря появлению целого ряда новых факторов (удешевление технологий генерации с использованием возобновляемых источников энергии и систем накопления электроэнергии, развитие систем интеллектуального учета и др.). Наиболее важной новой особенностью потребителей является возможность управления спросом. За рубежом в первую очередь уделяется внимание управлению спросом в домохозяйствах в зависимости от стоимости электроэнергии для снижения затрат на электроснабжение. Для достижения этой цели рассматриваются возможности уменьшения потребления наиболее энергоемкими приборами, а также планирование энергопотребления и собственного производства электроэнергии на сутки вперед на основе оптимизации экономических или технических параметров [15-17]. Отечественные исследователи решают задачи оптимизации точных графиков режимов работы приборов и оборудования, загрузки собственных генерирующих мощностей для домохозяйств и промышленных потребителей, а также координации

взаимодействия потребителей и электроснабжающих организаций при регулировании суточных графиков нагрузки [18, 19].

Основные преимущества, общесистемные эффекты и проблемы технологического присоединения распределенных источников энергии в распределительные сети рассмотрены в [20-24]. В [25, 26] описаны вопросы функционирования электрических сетей с объектами распределенной генерации (РГ), а в [27, 28] – проблемы релейной защиты, почасовой загрузки, качества электроэнергии устройств распределенной генерации. В [29, 30] представлены исследования режимной надежности систем электроснабжения с РГ и учетом каскадных отказов, а также модели для определения предельных режимов в электрических сетях, кроме того, методы для оценки параметров режима энергорайонов с объектами РГ. В ряде работ уделяется внимание оценке надежности систем энергоснабжения, в том числе оценке возможности обеспечения надежного электроснабжения потребителей за счет строительства объектов РГ [31-33]. Кроме того, распределенная генерация энергии рассматривается как один из факторов повышения энергетической безопасности и устойчивого развития регионов [34].

Несмотря на значительное количество публикаций, освещающих разные аспекты исследования и моделирования потребности в энергоносителях, поведения потребителей, возможностей распределенной генерации, не удалось найти работ, где эти факторы рассматривались бы комплексно, взаимосвязано с оценкой спроса на электроэнергию, цены и структуры ее производства в регионе.

2. Предлагаемый методический подход представляет собой многоуровневый многоэтапный процесс, каждый его этап состоит в решении одной или нескольких задач разной степени важности и сложности, характерных для разных временных стадий прогноза, для которых разработаны соответствующие методы и модели (рис.1). На каждом этапе полученные результаты анализируются и, при необходимости, исследование возвращается на предыдущий этап для корректировки условий или показателей.



Рис. 1. Основные задачи (этапы) исследования

и долгосрочного прогнозирования конъюнктуры на региональных энергетических рынках с учетом поведения потребителей (для одной временной стадии) [35]

2.1. Метод прогнозирования динамики цен на топливо. Прогнозирование динамики цен – отдельная сложная задача и, если имеются официальные прогнозы цен на разные виды топлива авторитетных организаций для рассматриваемого региона, этот этап исключается из схемы. Чаще всего таких прогнозов нет, и для оценки возможной динамики цен на разные виды топлива предлагается использовать разработку, представленную в [7] (рис. 2).

На основе статистической обработки рядов отчетных данных об изменении мировых и региональных цен на разные виды топлива определяется функциональная зависимость стоимости разных видов друг от друга, а также региональных цен от мировых. Этот анализ учитывается при формировании верхней и нижней границы возможного диапазона перспективной динамики цен на отдельные виды топлива по временным стадиям расчетного периода.



Рис. 2. Взаимосвязи блоков модели для прогнозирования динамики цен на топливо в регионе

Комментарии:

c_y – минимальные цены, топлива e (самофинансирования), u – себестоимость производства топлива e , руб./ед. прод., k – удельные капиталовложения, руб./ед. мощн., $0,12$ – коэффициент эффективности капиталовложений, c_{ei} – цена топлива e , используемого потребителем i , руб./т у.т., R_{ei} – цена продукции i при использовании топлива e (одинаковая для всех производителей данного вида продукции), руб./ед.прод., b_{ei} – удельный расход топлива e на производство продукции i , т у.т./ед.прод., u_{ei} – себестоимость продукции i производимой технологией с использованием топлива e , но без топливной составляющей, руб./ед. прод., k_{ei} – удельные капиталовложения на прирост мощности на производство продукции i на топливе e , руб./ед. мощности, h_{ei} – число часов использования установленной мощности оборудования в году, ч, E – коэффициент дисконтирования, c_e – цена топлива e в регионе, руб./т у.т., c_{em} – цена топлива e экспортируемого в регион, руб./т у.т. [7].

Нижняя граница диапазона цен определяется теми минимальными ценами, с которыми отдельные энергетические компании могут выходить на региональный рынок (цены самофинансирования) c_y .¹ Верхняя граница определяется в зависимости от того, имеет регион возможности импорта/экспорта топлива, или нет. Если имеет, то она соответствует цене равной доходности с мировой (мировая цена минус транспортные расходы), а для изолированных регионов определяется на основе межтопливной конкуренции. Для этого по годам расчетного периода находятся такие равноэкономичные цены на разные виды топлива, использование которых обеспечивает равную цену производимой потребителем продукции c_{ei} . Далее, полученные в результате расчета по периодам прогноза равновесные и равноэкономичные цены сравниваются с ценами самофинансирования для формирования перспективных диапазонов цен на разные виды топлива.

Модель для прогноза цен построена с использованием регрессионных и расчетных методов, имеет блочную структуру и связи, показанные на рисунке 2. Результаты этого этапа используются для оценки ценовой эластичности спроса на топливо (см. п.2.3.2).

2.2. Метод определения прогнозной потребности в энергоносителях в регионе. Он является составной частью методологии исследования возможных траекторий динамики спроса на энергоносители в стране, описанной в [1]. Спрос в регионе определяется в предположении, что развитие отдельных регионов подчинено общей концепции развития страны (см.

¹ Для действующих объектов такая цена должна обеспечивать покрытие ежегодных издержек, уплату налогов и минимальную прибыль для нормального функционирования, а для новых включать и инвестиционную составляющую.

подробнее [36]). Поэтому считается, что тенденции изменения энергоемкости ВРП² и душевого энергопотребления одинаковы как для страны в целом, так и для региона (рис. 3). Особенности в энергопотреблении регионов учитываются существующими отчетными тенденциями, а также наличием принятых к реализации инвестиционных проектов, либо иными известными приоритетами (изменение демографической политики, задачами национальной безопасности и т.д.), которые могут значительно повлиять на изменение общероссийской тенденции.

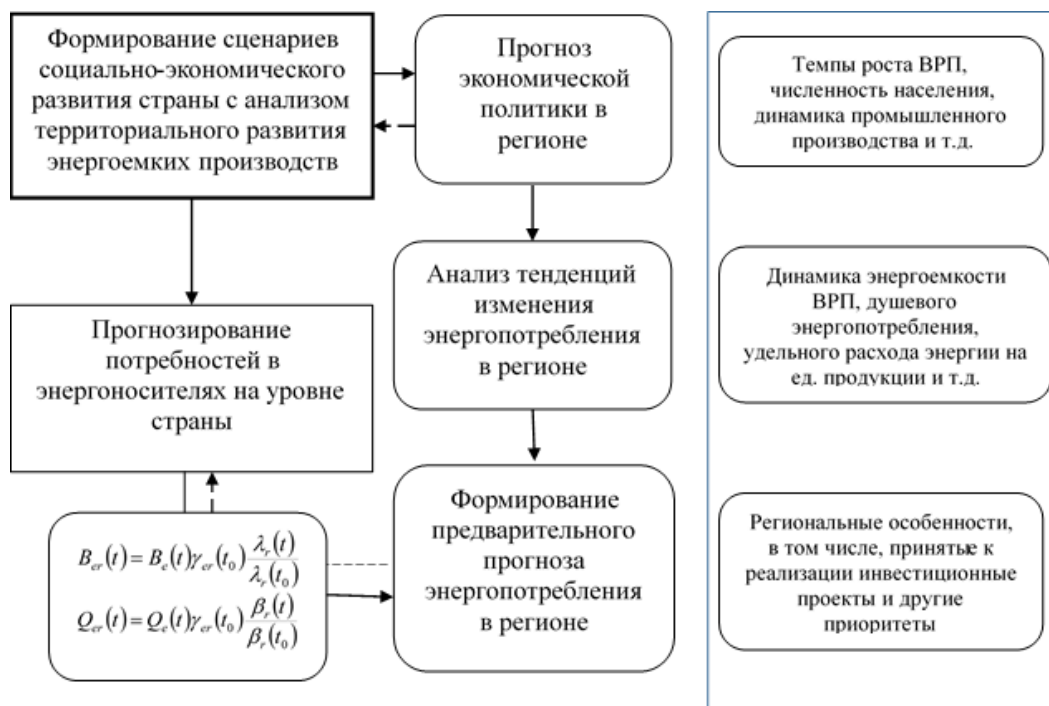


Рис. 3. Схема исследования и прогнозирования динамики потребности в энергоносителях в регионе

Комментарии:

$B_{er}(t)$, $Q_{er}(t)$ – потребность в энергоносителе e в регионе r в году t , соответственно производственной и непроизводственной сферы, $\gamma_{er}(t_0)$ – доля региона r в потреблении энергоносителя e в базовом году t_0 в производственной или непроизводственной сфере страны, λ_r – доля региона в общероссийском ВВП, β_r – доля региона в численности населения страны.

Исходной информацией для имитационной модели энергопотребления региона служат прогноз энергопотребления по стране в целом, полученный для выбранного сценария развития экономики и ТЭК, отчетные ряды экономических и энергетических показателей рассматриваемого региона, а также основные показатели программ и стратегий социально-экономической политики региона.

2.3. Выбор вариантов энерго- и топливоснабжения потребителей. Именно этот этап связан с оценкой влияния поведения потребителей. Основные положения решения этой задачи предложены в [37]. Особенность состоит в совместном взаимосвязанном рассмотрении системы потребления и энергоснабжения региона. Важной чертой является итерационное согласование результатов решения системы моделей разного уровня иерархии: системы энергоснабжения макрорегиона и региональных систем – энергоснабжения и энергопотребления (рис. 4). Возможные (N_r) уровни развития распределенной генерации (РГ) в разных секторах экономики системы энергопотребления (жилой и коммерческий сектор, промышленность,

² ВРП – валовой региональный продукт

транспорт) рассчитываются во взаимосвязи с ценой производства электроэнергии в энергосистеме (p), которая, в свою очередь, может меняться в зависимости от масштабов РГ (обратное, (корректирующее) влияние). Результаты, полученные для рассматриваемого региона, могут быть использованы для уточнения и возможного изменения структуры и стоимости производства электроэнергии в макрорегионе.

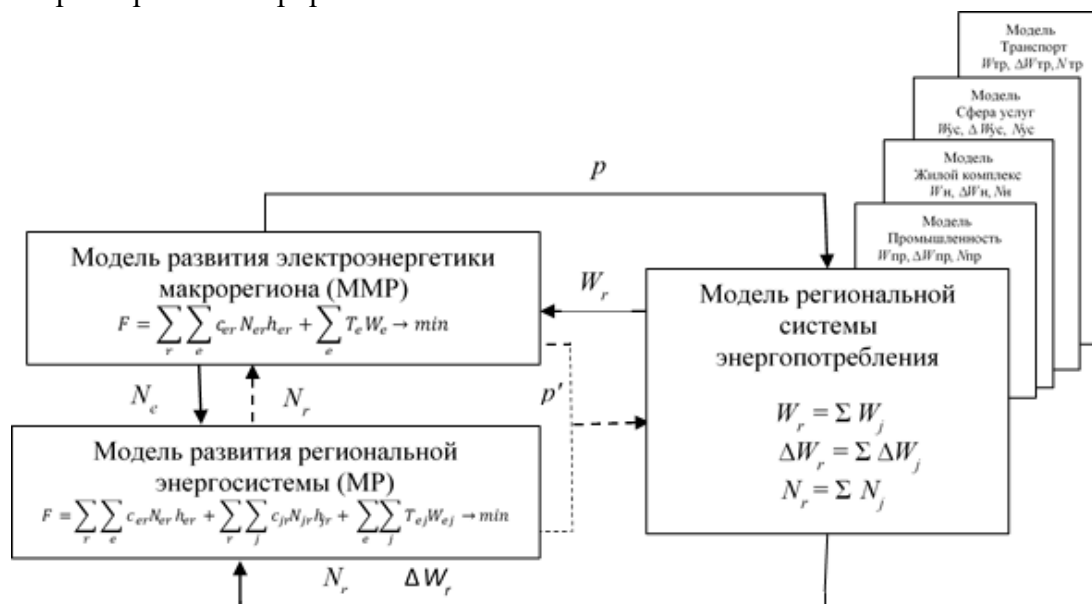


Рис. 4. Взаимосвязи моделей разного уровня иерархии для оценки влияния поведения потребителей на развитие распределенной генерации и на конъюнктуру региональных энергетических рынков

Комментарии:

c_{er} – приведенные затраты на выработку электроэнергии на станции типа e (руб/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 (руб/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 (руб/кВтч), W_{ej} – объем передачи электроэнергии от электростанции типа e и установки РГ типа j (кВтч).

Реализация подхода предполагает использование оригинальных оптимизационных и имитационных моделей, учитывающих взаимозависимость развития систем энергопотребления и энергоснабжения.

2.3.1. Алгоритм для оценки влияния поведения потребителей на спрос на электроэнергию и развитие распределенной генерации в региональной системе энергопотребления. Алгоритм представляет собой последовательность для определения объема потребления электроэнергии в регионе (W_r), возможной величины его снижения (ΔW_j), масштабов применения установок РГ (N_j). Для определения последних, удельные капитальные и эксплуатационные затраты определяются для каждого сектора отдельно с учетом их зависимости от масштаба развития РГ (более полное описание см. в [38]).

Предусматривается следующая последовательность: (1) находится максимально возможный уровень спроса на электроэнергию (W_r) для региональной энергосистемы как сумма потребности отдельных потребителей (W_j); (2) в соответствии с полученным значением цены

электроэнергии (p) в централизованной сети активные потребители и просьюмеры оптимизируют свое энергопотребление и формируют объем возможного его снижения (ΔW_p); (3) определяется величина задействованных мощностей РГ (N_r) (рис. 5).

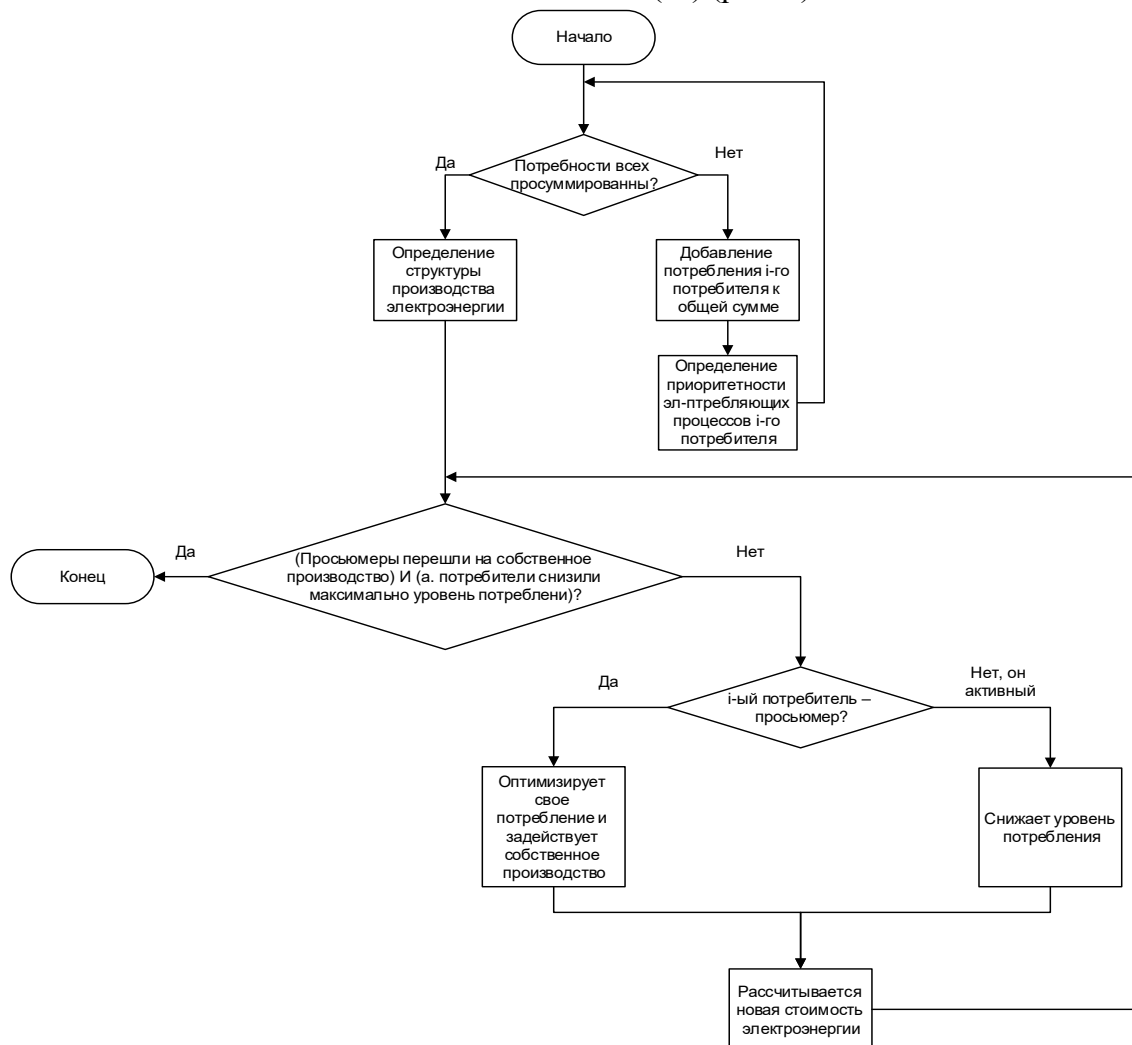


Рис. 5. Алгоритм для оценки влияния поведения потребителей на спрос на электроэнергию в регионе [38]

Эта информация передается в модель энергоснабжения региона МР, где определяется новая структура производства и стоимость электроэнергии (p'). При сравнении значений p и p' может потребоваться новая итерация расчетов.

Для каждого рассматриваемого потребителя в системе энергопотребления разрабатывается многоагентная модель, имитирующая его поведение в зависимости от разной стоимости электроэнергии в энергосистеме. Она позволяет оценить величину возможного снижения объемов потребления электроэнергии (ΔW_j) и развития собственных мощностей по производству энергии (N_j) при разной стоимости электроэнергии p . Модель состоит из набора агентов (рис. 6), каждый из которых описывает особенности функционирования отдельного энергопотребляющего или генерирующего устройства. Контроль и согласование их поведения осуществляет агент-менеджер. В нем находятся описания всех возможных сценариев взаимосогласованного поведения собственных энергопотребляющих и производящих процессов потребителя и возможных его взаимосвязей с централизованной энергосистемой. В зависимости от складывающейся ситуации в централизованной системе агент-менеджер посылает управляющие воздействия агентам потребления и генерации для реализации сценария, соответствующего интересам потребителя (см. подробнее [39]).

2.3.2. Оценка ценовой эластичности спроса на топливо (по группам потребителей).

Для оценки на одной методической основе разработан набор моделей разных групп потребителей (электростанции, котельные, промышленность, транспорт) для отдельных регионов. Этой основой является совместное использование методов оптимизации и Монте-Карло. Первый метод используется для выбора рациональной структуры топливоснабжения потребителей, второй – для учета неопределенности будущих условий. Исходные технико-экономические, ценовые и другие показатели и ограничения задаются в виде интервалов их перспективных значений с возможностью задания вида распределения вероятности в этих интервалах. Последнее позволяет оценить влияние на решение качества имеющейся информации [40].



Рис.6. Принципиальная схема многоагентной модели просьюмера [39]

Для определения перспективной потребности в разных видах энергоресурсов отдельных потребителей (например, новых электростанций или крупных котельных) в предполагаемых в регионе условиях топливоснабжения, проводится серия из сотен модельных экспериментов (метод Монте-Карло), из которых формируется вариант с минимальной стоимостью производимой продукции потребителя. Полученные в результате объемы потребления того или иного вида топлива при разных значениях его стоимости позволяют определить коэффициенты ценовой эластичности спроса (показывает изменение потребности в энергоносителе при изменении его стоимости на 1%) для каждой группы потребителей. Региональная ценовая эластичность на тот или иной энергоресурс определяется на основе существующей структуры его потребления с учетом полученных коэффициентов эластичности для отдельных групп потребителей (табл.1).

Полученные коэффициенты региональной ценовой эластичности спроса на тот или иной ресурс позволяют оценить возможное снижение его потребления в регионах в перспективе при разной ценовой политике и при необходимости скорректировать прогноз на энергоносители, как на региональном уровне, так и на уровне страны.

Таблица 1. - Прогнозная ценовая эластичность спроса на природный газ в регионах России для разной временной перспективы и вероятности исходной информации

Регион	Краткосрочная перспектива		Долгосрочная перспектива	
	Интервальное распределение	Нормальное распределение	Интервальное распределение	Нормальное распределение
Европейская часть	-0,10	-0,04	-0,61	-0,50
Урал	-0,18	-0,12	-0,44	-0,31
Западная Сибирь	-0,48	-0,47	-0,60	-0,48
Восточная Сибирь	-1,29	-1,26	-1,28	-1,27
Дальний Восток (южная часть)	-0,78	-0,74	-0,88	-0,75

Примечание: суммарный перспективный спрос на газ в регионах определялся по основным группам потребителей и в предположении о неизменности структуры потребления газа в регионе.

Заключение. Особенностью очередного энергетического перехода является кардинальное изменение роли потребителя в энергосистеме, у которого появляется возможность управлять своим энергопотреблением, иметь собственные мощности по производству и хранению энергии, тем самым влиять на уровень спроса и цену в региональной энергетической системе. Особенности перехода обуславливают повышение значимости регионального уровня, где происходит непосредственное согласование интересов производителей и потребителей энергии. Предлагаемая многоэтапная методология позволяет определить взаимное влияние спроса и цен на региональных энергетических рынках с учетом поведения потребителей и оценить региональную ценовую эластичность спроса на отдельные энергоресурсы. Для реализации в соответствии с целями каждого этапа разрабатывается набор моделей разного вида и уровня агрегирования, что позволяет проводить многовариантные расчеты с учетом качества имеющейся информации.

Дальнейшее развитие методологии предполагает разработку методов оценки и учета взаимозависимости цифровизации, децентрализации и декарбонации в долгосрочных прогнозах развития энергоснабжения регионов, что будет способствовать повышению обоснованности перспективных вариантов 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 при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-010-00204.

Список источников

1. Гальперова Е.В. Методология исследования долгосрочной динамики спроса на энергоносители для повышения обоснованности перспектив развития ТЭК: состав задач, методы и модели / Е.В. Гальперова // Изв. РАН. Энергетика, 2021. – № 1. – С. 101-108. – DOI: 10.31857/S0002331021010064.
2. Филиппов С.П. Долгосрочное прогнозирование спроса на энергию на основе системного анализа / С.П. Филиппов, В.А. Малахов, Ф.В. Веселов // Теплоэнергетика, 2021. – № 12. – С. 5-19. – DOI:10.1134/S0040363621120043.
3. Гальперова Е.В. Использование стэнда моделей для долгосрочного прогнозирования рыночного спроса на энергоносители / Е.В. Гальперова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2016. – № 4-2. – С. 17-27.
4. Bhattacharyya, Subhes C. and Timilsina, Govinda R. Energy Demand Models for Policy Formulation: A Comparative Study of Energy Demand Models (March 1, 2009). World Bank Policy Research Working Paper No. 4866, available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1368072> (accessed 23.08.2022).
5. Suganthi L., Anand A. Samuel. Energy models for demand forecasting – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (2012), pp. 1223-1240.
6. Беляев Л.С. Системные исследования проблем энергетики / Л.С. Беляев, Б.Г. Санеев, С.П. Филиппов и др.; Под. ред. Н.И. Воропая. – Новосибирск: Наука. Сибирская фирма РАН, 2000. – 558 с.
7. Кононов Ю.Д. Методы и модели прогнозных взаимосвязей энергетики и экономики / Ю.Д. Кононов, Е.В. Гальперова, Д.Ю. Кононов и др. – Новосибирск: Наука, 2009. – 179 с.
8. Системные исследования в энергетике: методология и результаты / Под ред. А.А. Макарова, Н.И. Воропая. – М.: ИНЭИ РАН, 2018. – 309 с.
9. Макаров А.А. SCANNER — модельно-информационный комплекс / АА. Макаров, Ф.В. Веселов, О.А. Елисеева и [др.] – М.: ИНЭИ РАН, 2011. – 72 с.
10. Long range Energy Alternatives Planning (LEAP) System. Available at: [https://openei.org/wiki/Long_range_Energy_Alternatives_Planning_\(LEAP\)_System](https://openei.org/wiki/Long_range_Energy_Alternatives_Planning_(LEAP)_System). (accessed: 3.08.2022).
11. POLES: Prospective Outlook on Long-term Energy Systems. Available at: <https://www.enerdata.net/solutions/poles-model.html> (accessed: 3.08.2022).

12. The National Energy Modeling System: An Overview 2018. – U.S. Energy Information Administration. Washington, DC 20585, 75 p., available at: [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/pdf/0581\(2018\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/pdf/0581(2018).pdf) (accessed:03.08.2022).
13. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью / Под ред. Е.В. Фортова, А.А. Макарова. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2012. – 235 с.
14. Кузьмин П.С. Активные потребители электроэнергии: обзор инновационных моделей взаимодействия субъектов электроэнергетики и конечных потребителей / П.С. Кузьмин // Стратегические решения и риск-менеджмент, 2022. – №12(4). – С. 306–321. – DOI: 10.17747/2618-947X-2021-4-306-321.
15. Ning Zhanng, Ochoa L.F., Kirschen D.S. Investigating the impact of demand side management on residential consumers. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, Manchester, UK, December 5-7., 2011, 7 p.
16. Juan M. Lujano-Rojas, Claudio Monteiro, Rodolfo Dufo-Lopez, Jose L. Bernal-Agustin. Optimum residential load management strategy for real time pricing demand response programs. Energy Policy, 2012, vol. 45, pp. 671–679.
17. Amir-Hamed Mohsenian-Rad, Alberto Leon-Garcia. Optimal Residential Load Control With Price Prediction in Real-Time Electricity Pricing Environments. IEEE Trans. on Smart Grid, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 120–133.
18. Воропай Н.И. Оптимизация суточных графиков нагрузки активных потребителей / Н.И. Воропай, З.А. Стычински, Е.В. Козлова [и др.] // Известия РАН. – Энергетика. – 2014. – №1. – С.84–90.
19. Айзенберг Н.И. Координация взаимодействия электроснабжающей организации и активных потребителей при оптимизации суточных графиков нагрузки / Н.И. Айзенберг, Е.В. Сташкевич, Н.И. Воропай // Известия РАН. – Энергетика, 2016. – №3. – С. 44–54.
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 / Илюшин П.В. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2020. – 116 с.: ил., – DOI: 10.34831/EP.2020.260.8.001.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. Косарев Б.А. Оптимизация функционирования электротехнической системы с распределенной генерацией / Б.А. Косарев, Г.А. Кошук, В.К. Федоров [и др.] // Актуальные вопросы энергетики, 2019. – № 1. – с. 99-103.
26. 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.
27. Шарыгин М.В. Адаптивная релейная защита электрических сетей с источниками распределенной генерации / М.В. Шарыгин, А.Л. Куликов, В.Ю. Вуколов [и др.] // Изв. РАН. Энергетика, 2020. – № 3. – С. 60-68. – DOI: 10.31857/S000233102003005X.
28. Солнцев Е.Б. Анализ качества электроэнергии (колебаний напряжения) при распределенной генерации / Е.Б. Солнцев, А.М. Мамонов, А.Н. Фитасов [и др.] // Энергобезопасность и энергосбережение, 2019. – № 3. – С. 37-40.
29. Булатов Ю.Н. Математические модели для определения предельных режимов в электрических сетях с установками распределенной генерации / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, А.В. Черепанов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета, 2020. – № 4 (80). – С. 17-36.
30. Куликов А.Л. Применение дискриминаторных методов для оценки параметров режима энергорайонов с объектами распределенной генерации / А.Л. Куликов, П.В. Илюшин, П.С. Пелевин // Электричество. – 2019. – № 7. – С. 22-35.
31. Папков Б.В. Особенности оценки структурной надежности систем с объектами распределенной генерации / Б.В. Папков, В.Л. Осокин // Известия РАН. Энергетика, 2020. – № 2. – С. 75-84. – DOI: 10.31857/S0002331020020090.
32. Варганова А.В. Техничко-экономическое обоснование места установки источников распределенной генерации / А.В. Варганова, Ю.М. Байрамгулова, И.Н. Гончарова [и др.] // Электротехнические системы и комплексы, 2019. – № 3 (44). – С. 68-72.
33. 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.

34. Филиппов С.П. Распределенная генерация и устойчивое развитие регионов / С.П. Филиппов, М.Д. Дильман, П.В. Илюшин // Теплоэнергетика, 2019. – № 12. – С. 4-17.
35. Кононов Ю.Д. Пути повышения обоснованности долгосрочных прогнозов развития ТЭК / Ю.Д. Кононов – Новосибирск: Наука, 2015. – 147 с.
36. Гальперова Е.В. Особенности прогнозирования энергопотребления на региональном уровне / Е.В. Гальперова // Изв. РАН. Энергетика, 2004. – № 4. – С. 61-66.
37. Гальперова Е.В. Метод и модели для оценки влияния развития распределенной генерации на спрос и цену электроэнергии в регионе / Е.В. Гальперова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. – № 3 (23). – С. 101- 116. – DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.009.
38. Гальперова Е.В. Применение интеллектуальных методов для моделирования влияния новых факторов в развитии энергетики на спрос на электроэнергию / Е.В. Гальперова, В.И. Гальперов, В.И. Локтионов [и др.] // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2019. – № 1 (13). – С. 16-29. – DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-02.
39. Гальперова Е.В. Моделирование поведения активного потребителя на основе агентного подхода / Е.В. Гальперова, В.И. Гальперов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2017. – № 4(8). – С. 28-38.
40. Гальперова Е.В. Комплекс моделей для долгосрочного прогнозирования конъюнктуры региональных энергетических рынков / Е.В. Гальперова, Д.Ю. Кононов, В.Н. Тыртышный // Труды XIX Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Часть I. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. – С.14-21.

Гальперова Елена Васильевна. Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Основные научные интересы: исследование и долгосрочное прогнозирование динамики и структуры энергопотребления, конъюнктуры региональных энергетических рынков с учетом научно-технологического прогресса, качества жизни населения, ценовых и экологических показателей и ограничений. AuthorID: 73970, SPIN: 5744-2377, ORCID: 0000-0001-6749-8630, galper@isem.irk.ru, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова 130.

UDC 338.27:51-74

DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.001

Consumer behavior-informed methodology for studying and making long-term projections of the state of regional energy markets: its tasks, approaches, algorithms, and models

Elena V. Galperova

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS

Russia, Irkutsk, galper@isem.irk.ru

Abstract. The relevance of the article is due to the importance of the study of the relationship between demand and prices in regional energy markets for the purposes of forming the long-term dynamics of energy demand and working out strategic decisions in the field of energy and economic security of the country and its regions. The need to develop new approaches to study the long-term state of regional energy markets is caused, among other things, by the latest in a series of energy transitions that is ongoing in the world. One of the main features of the transition is that consumers have the ability to control their energy consumption, to have energy production and storage capacity, and to interact with the power system. These new properties of consumers are changing the very system of energy supply and pricing in the energy sector.

This study describes the multi-stage methodological approach developed by the author. Each stage of the approach consists of the successive solving of an individual problem or several problems of varying importance and complexity, for each of which we have developed dedicated methods and models. The key defining feature of the approach is the possibility to return (if necessary) to the previous stage to adjust conditions or parameters. A unique feature of the approach is the joint interrelated treatment of the system of consumption and energy supply of the region and the iterative alignment of decisions made at the regional level with the energy supply system of the higher territorial level. The proposed multi-stage methodology makes it possible to determine the mutual influence of demand and prices in regional energy markets, taking into account consumer behavior and evaluates the regional price elasticity of demand for certain energy resources. This will enable one to adjust the long-term

dynamics of demand for energy and will contribute to improving the validity of future options of development of the power industry and energy sector.

Keywords: energy carriers, demand, consumers, distributed generation, modeling, consumption system, price

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

References

1. Galperova E.V. Metodologiya issledovaniya dolgosrochnoj dinamiki sprosa na energonositeli dlya povysheniya obosnovannosti perspektiv razvitiya TEK: sostav zadach, metody i modeli [A 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]. *Izv. RAN. Energetika* [Bulletin of RAS. Energy Series], 2021, no. 1, pp. 101-108, DOI: 10.31857/S0002331021010064.
2. Filippov S.P., Malahov V.A., Veselov F.V. Dolgosrochnoe prognozirovanie sprosa na energiyu na osnove sistemnogo analiza [Long-term forecasting of energy demand based on system analysis]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2021, no. 12, pp. 5-19, DOI:10.1134/S0040363621120043.
3. 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, no. 4-2, pp. 17-27.
4. Bhattacharyya, Subhes C. and Timilsina, Govinda R. Energy Demand Models for Policy Formulation: A Comparative Study of Energy Demand Models (March 1, 2009). World Bank Policy Research Working Paper No. 4866, available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1368072> (accessed 23.08.2022).
5. Suganthi L., Anand A. Samuel. Energy models for demand forecasting – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (2012), pp. 1223-1240.
6. Belyayev L.S. Sistemnye issledovaniya problem energetiki [Systematic studies of energy problems]. Ed. by N.I. Voropay, Novosibirsk, Nauka, Sibirskaya firma RAN [Science. Siberian firm RAS], 2000, 558 p.
7. Kononov Yu.D., Galperova E.V., Kononov D.Yu. i dr. Metody i modeli prognoznyh vzaimosvyazej energetiki i ekonomiki [Methods and models for projections of energy-economy interactions]. Novosibirsk, Nauka [Science], 2009, 178 p.
8. Sistemnye issledovaniya v energetike: metodologiya i rezul'taty [Energy systems analysis: methodology and research findings] Ed. by A.A. Makarov, N.I. Voropay, Moscow, INEI RAN, 2018, 309 p.
9. Makarov A.A., Veselov F.V., Eliseeva O.A., Kulagin V.A., Malahov V.A., Mitrova T.A., Filippov S.P. SCANNER — model'no-informacionnyj kompleks [SCANNER - model-information complex]. Moscow, INEI RAN, 2011, 72 p.
10. Long range Energy Alternatives Planning (LEAP) System. Available at: [https://openei.org/wiki/Long_range_Energy_Alternatives_Planning_\(LEAP\)_System](https://openei.org/wiki/Long_range_Energy_Alternatives_Planning_(LEAP)_System). (accessed: 03.08.2022).
11. POLES: Prospective Outlook on Long-term Energy Systems. Available at: <https://www.enerdata.net/solutions/poles-model.html> (accessed:03.08.2022).
12. The National Energy Modeling System: An Overview 2018. – U.S. Energy Information Administration. Washington, DC 20585, 75 p., available at: [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/pdf/0581\(2018\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/pdf/0581(2018).pdf) (accessed:03.08.2022).
13. Konceptiya intellektual'noj elektroenergeticheskoy sistemy Rossii s aktivno-adaptivnoj set'yu [The concept of an intelligent electric power system in Russia with an active-adaptive grid]. Ed. by E.V. Fortov, A.A. Makarov, Moscow, OAO «FSK EES», 2012, 235 p.
14. Kuz'min P.S. Aktivnye potrebiteli elektroenergii: obzor innovacionnyh modelej vzaimodejstviya sub'ektov elektroenergetiki i konechnyh potrebitelej [Active electricity consumers: a review of innovative models of interaction between subjects of the electric power industry and final consumers]. *Strategicheskie resheniya i risk-menedzhment* [Strategic decisions and risk management], 2022, no. 12(4), pp. 306-321, DOI: 10.17747/2618-947X-2021-4-306-321.
15. Ning Zhanng, Ochoa L.F., Kirschen D.S. Investigating the impact of demand side management on residential consumers. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*, Manchester, UK, December 5-7., 2011, 7 p.
16. Juan M. Lujano-Rojas, Claudio Monteiro, Rodolfo Dufo-Lopez, Jose L. Bernal-Agustin. Optimum residential load management strategy for real time pricing demand response programs. *Energy Policy*, 2012, vol. 45, pp. 671-679.
17. Amir-Hamed Mohsenian-Rad, Alberto Leon-Garcia. Optimal Residential Load Control With Price Prediction in Real-Time Electricity Pricing Environments. *IEEE Trans. on Smart Grid*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 120-133.

18. Voropaj N.I., Stychinski Z.A., Kozlova E.V., Stepanov V.S., Suslov K.V. Optimizaciya sutochnyh grafikov nagruzki aktivnyh potrebitelej [Optimization of daily load schedules for active consumers]. *Izv. RAN. Energetika [Bulletin of RAS. Energy Series]*, 2014, no. 1, pp.84-90.
19. Ajzenberg N.I., Stashkevich E.V., Voropaj N.I. Koordinaciya vzaimodejstviya elektrosnabzhayushchej organizacii i aktivnyh potrebitelej pri optimizacii sutochnyh grafikov nagruzki [Coordination of interaction between the power supply organization and active consumers in the optimization of daily load schedules]. *Izv. RAN. Energetika [Bulletin of RAS. Energy Series]*, 2016, no. 3, pp. 44-54.
20. Gurevich Yu.E., Ilyushin P.V. Osobennosti raschetov rezhimov v energorajonah s raspredelennoj generaciej [Peculiarities of mode calculations in power districts with distributed generation]. N. Novgorod, NIU RANHiGS, 2018, 280 p.
21. Ilyushin P.V. Perspektivy primeneniya i problemnye voprosy integracii raspredelennyh istochnikov energii v elektricheskije seti [Prospects for application and problematic issues of integration of distributed energy sources into electrical networks], Moscow, NTF «Energoprogress», 2020, 116 p., DOI: 10.34831/EP.2020.260.8.001.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. Kosarev B.A., Koshchuk G.A., Fedorov V.K., Lysenko O.A. Optimizaciya funkcionirovaniya elektrotekhnicheskoy sistemy s raspredelennoj generaciej [Optimization of the functioning of an electrical system with distributed generation]. *Aktual'nye voprosy energetiki [Current Energy Issues]*, 2019, no. 1, pp. 99-103.
26. 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.
27. Sharygin M.V., Kulikov A.L., Vukolov V.YU., Petrov A.A. Adaptivnaya relejnaya zashchita elektricheskikh setej s istochnikami raspredelennoj generacii [Adaptive relay protection of electrical networks with sources of distributed generation]. *Izv. RAN. Energetika [Bulletin of RAS. Energy Series]*, 2020, no. 3, pp. 60-68, DOI: 10.31857/S000233102003005X.
28. 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 power quality (voltage fluctuations) in distributed generation]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie [Energy security and energy saving]*, 2019, no. 3, pp. 37-40.
29. 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 modes in electrical networks with distributed generation installations]. *Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University]*, 2020, no. 4 (80), pp. 17-36.
30. 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 the mode parameters of energy districts with distributed generation objects]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 2019, no. 7, pp. 22-35.
31. Papkov B.V., Osokin V.L. Osobennosti ocenki strukturnoj nadezhnosti sistem s ob"ektami raspredelennoj generacii [Features of assessing the structural reliability of systems with distributed generation facilities]. *Izv. RAN. Energetika [Bulletin of RAS. Energy Series]*, 2020, no. 2, pp. 75-84, DOI: 10.31857/S0002331020020090.
32. 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, no. 3 (44), pp. 68-72.
33. 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.
34. Filippov S.P., Dil'man M.D., Ilyushin P.V. Raspredelennaya generaciya i ustojchivoe razvitie regionov [Distributed generation and sustainable development of regions]. *Teploenergetika [Thermal Engineering]*, 2019, no. 12, pp. 4-17.
35. Kononov Yu.D. Puti povysheniya obosnovannosti dolgosrochnyh prognozov razvitiya TEK [Approaches to improve the validity of long-term projections of the energy sector]. Novosibirsk, Nauka [Science], 2015, 147 p.

36. Galperova E.V. Osobennosti prognozirovaniya energopotrebleniya na regional'nom urovne [Features of forecasting energy consumption at the regional level]. Izv. RAN. Energetika [Bulletin of RAS. Energy Series], 2004, no. 4, pp. 61-66.
37. Galperova E.V. Metod i modeli dlya ocenki vliyaniya razvitiya raspredelennoj generacii na spros i cenu elektroenergii v regione [Method and models for assessing the impact of the development of distributed generation on the demand and price of electricity in the region]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2021, no. 3 (23), pp. 101-116, DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.009.
38. Galperova E.V., Galperov V.I., Loktionov V.I., Makagonova N.N. Primenenie intellektual'nyh metodov dlya modelirovaniya vliyaniya novyh faktorov v razvitiie energetiki na spros na elektroenergiyu [Application of intellectual methods for modeling of the influence of new factors of energy sector development on electricity demand]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2019, no. 1 (13), pp. 16-29, DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-02.
39. Galperova E.V., Galperov V.I. Modelirovanie povedeniya aktivnogo potrebitelya na osnove agentnogo podhoda [Modeling the active consumer behavior based on the agent approach]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2017, no. 4 (8), pp. 28-38.
40. Galperova E.V., Kononov D.Yu., Tyrtyshtnyj V.N. Kompleks modelej dlya dolgosrochnogo prognozirovaniya kon'yunktury regional'nyh energeticheskikh rynkov [A set of models for long-term forecasting of the conjuncture of regional energy markets]. Trudy XIX Bajkal'skoj Vserossijskoj konferencii «Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii». CHast' I [Proceedings of the XIX Baikal All-Russian Conference "Information and Mathematical Technologies in Science and Management". Part I], Irkutsk, ISEM SO RAN, 2014, 175 p., pp.14-21.

Elena V. Galperova. Ph. D., Associate Professor, Senior researcher of Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, Russia, Irkutsk. Her main research interests: long-term forecasting of regional energy markets, and research of energy consumption patterns, projections of energy demand taking into account technological patterns, standards of living, price and ecological indicators. AuthorID: 73970, SPIN: 5744-2377, ORCID: 0000-0001-6749-8630, galper@isem.irk.ru, 664033, Irkutsk, st. Lermontov 130.

Статья поступила в редакцию 09.09.2022; одобрена после рецензирования 14.09.2022; принята к публикации 25.11.2022.

The article was submitted 09/09/2022; approved after reviewing 09/14/2022; accepted for publication 11/25/2022