

**МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ВЛИЯНИЯ  
РАЗВИТИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ  
НА СПРОС И ЦЕНУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РЕГИОНЕ**

**Гальперова Елена Васильевна**

К.т.н., доцент, старший научный сотрудник,  
зав. лабораторией «Взаимосвязи энергетики и экономики»  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН  
664033, г. Иркутск, Россия, ул. Лермонтова, 130  
e-mail:galper@isem.irk.ru

**Гальперов Василий Ильич**

К.т.н., младший научный сотрудник  
отдела «Системы искусственного интеллекта в энергетике»  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН  
664033, г. Иркутск, Россия, ул. Лермонтова, 130  
e-mail:galperov@gmail.com

**Аннотация.** Развитие цифровых технологий меняет свойства систем электроснабжения и стирает границу между производителями и потребителями электроэнергии. В статье представлен метод формирования стоимости электроэнергии в региональной энергосистеме, который является составной частью подхода к оценке влияния развития интеллектуальных систем энергетики на спрос на электроэнергию в регионе. Определение стоимости электроэнергии в системе состоит в последовательном согласовании требуемых объемов потребления электроэнергии и возможностей производителей, стремящихся к достижению своих лучших экономических показателей. Каждый производитель описывается в виде оптимизационной модели, которая является отдельным агентом в многоагентной модели энергосистемы.

**Ключевые слова:** цифровые технологии, интеллектуальные сети, активный потребитель, оптимизация, агентный подход, спрос на электроэнергию, цена.

**Цитирование:** Гальперова Е. В., Гальперов В.И. Методический подход к исследованию влияния развития интеллектуальных систем энергетики на спрос и цену электроэнергии в регионе // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 1 (17). С. 55 – 67. DOI: 10.38028/ESI.2020.17.1.004

**Введение.** Исследование и прогнозирование перспективной динамики объемов и изменения структуры спроса на топливно-энергетические ресурсы (ТЭР) являются одними из важнейших задач при разработке и принятии стратегических решений в области энергетической и экономической безопасности страны и регионов и политики, направленной на повышение качества жизни населения. В Доктрине энергетической безопасности Российской Федерации<sup>1</sup> среди рисков, связанных с внутренними вызовами и угрозами

<sup>1</sup> Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 13 мая 2019 г. № 216

энергетической безопасности, указывается «отсутствие в долгосрочной перспективе определенности относительно спроса на продукцию и услуги организаций топливно-энергетического комплекса в субъектах Российской Федерации». Кроме того, представление о динамике и структуре спроса на энергоносители необходимо иметь при разработке эффективных направлений развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) страны и регионов, надежности энергоснабжения территорий, долгосрочных программ деятельности энергетических компаний и др.

Сложности в исследовании и прогнозировании спроса на энергоносители обусловлены многозначностью и взаимосвязанностью факторов, определяющих уровни и структуру потребности в ТЭР, высокой их вариативностью и изменением во времени. Попытки преодоления этих сложностей обусловили разработку довольно большого количества подходов, методов и моделей прогнозной оценки спроса на топливо и энергию, как у нас в стране, так и за рубежом. Это эвристические методы (экспертные оценки, мозговой штурм, Делфи и др.), основанные на знаниях и опыте специалистов, работающих в этой области (см., например, [9, 28]), методы экстраполяции и выявления долгосрочных тенденций и закономерностей в изменении энергопотребления в зависимости от основных макроэкономических показателей развития разных стран (см., например, [1, 12, 13, 19]), а также построения различных моделей (имитационных, оптимизационных, балансовых) (см., например, [17, 24, 31, 32]). Модели используются как для решения самостоятельных задач прогноза потребности в ТЭР, так и входят составной частью в состав модельных комплексов для определения направлений развития энергетики [11, 27, 30, 33].

Несмотря на наличие значительного количества разработанных методов, они не учитывают или не в полной мере учитывают изменения условий формирования перспективного спроса на энергоресурсы, в частности, бурного развития и применения цифровых технологий в производстве и потреблении энергии. При создании интеллектуальных систем наибольшие изменения коснутся регионального уровня, где происходит согласование интересов производителей и потребителей энергии. Появление активных потребителей, способных управлять собственным энергопотреблением, имеющих возможности хранения и производства электроэнергии, смещает фокус прогнозов на региональный уровень, повышает его значимость в определении суммарного спроса на уровне страны и требует дальнейшего развития методов исследования и прогнозирования перспективной потребности в ТЭР.

**Цифровые технологии в производстве и потреблении энергии.** Развитие и внедрение цифровых технологий способствуют появлению новых свойств систем электроснабжения. Основными из них являются: 1) умное управление спросом; 2) появление небольших распределенных ресурсов электроэнергии, в том числе на основе возобновляемых источников энергии; 3) внедрение интеллектуальной зарядки для электромобилей.

*Управление спросом (demand responds).* Это механизм, который дает возможность потребителям электроэнергии реагировать на параметры системы для обеспечения надежного энергоснабжения при минимальных затратах. Цифровые технологии учета, управления и связи позволяют потребителю непрерывно контролировать использование энергии своими приборами и оборудованием, передавать эти данные поставщику электроэнергии и получать от него информацию для оптимизации собственного спроса в соответствии с имеющимся в энергосистеме предложением. В часы, когда электроснабжение ограничено или сети

перегружены, подключенные устройства, такие, как интеллектуальные электрические обогреватели и кондиционеры, промышленные котлы и интеллектуальные бытовые приборы, могут автоматически отключаться или работать при более низкой нагрузке, причем делать это таким образом, чтобы не влиять на комфорт и условия работы потребителя [7, 10, 23, 25].

*Развитие небольших распределенных энергоресурсов (distributed generation)* позволяет снижать потери при передаче и распределении энергии, более гибко реагировать на изменение спроса, а также во многих случаях повышать надежность энергоснабжения. К распределенным (малым) источникам энергии относят совокупность технологий, представленных небольшими или даже микро-установками, которые позволяют генерировать энергию рядом с местом ее потребления, например, домашние солнечные фотоэлектрические системы [2, 4, 14, 18]. Распространение цифровых технологий дает возможность потребителям иметь собственное производство и/или технологии хранения электроэнергии, продавать и/или покупать ее как у отдельного продавца, так и энергосистемы.

*Интеллектуальная зарядка для электромобилей (smart charging)* позволяет подключенным электромобилям заряжаться в соответствии с ценовыми и/или другими управляющими сигналами в энергосистеме. Например, потреблять энергию, когда имеется производство дешевого электричества, или находится в режиме ожидания, когда сеть перегружена. Если имеется возможность двунаправленной зарядки аккумуляторной батареи, помимо интеллектуальной зарядки, электромобили могут обеспечить более высокую гибкость системы, путем продажи электроэнергии сетевому оператору или использовать ее для удовлетворения потребности в собственном доме (*Vehicle-to-grid*). Этот двусторонний обмен энергией дает ряд экономических, экологических и эксплуатационных преимуществ [21, 22, 26, 29].

В условиях растущего числа разнородных устройств, владельцев и операторов в интеллектуальных энергосистемах их координацию, а также автоматизацию торговли может помочь решить *технология распределенного реестра (blockchain)*<sup>2</sup> [3, 8, 15, 16, 20].

Использование цифровых технологий в энергетике способствует развитию интеллектуальных систем и сетей, цифровизации систем контроля, учета, управления энергоснабжением и преобразует сетевую инфраструктуру в новую киберфизическую платформу для гибкого и эффективного энергообеспечения различного рода потребителей. Учет этих особенностей в методах и моделях долгосрочного прогнозирования спроса на энергоносители позволит улучшить качество прогнозов, повысить обоснованность перспективных вариантов развития ТЭК и стратегических решений в области энергетической и экономической безопасности страны и регионов.

**Предлагаемый подход к оценке формирования цены электроэнергии в регионе с учетом цифровых технологий.** Данная статья является последовательным продолжением и развитием методического подхода по оценке влияния развития интеллектуальных систем на спрос на электроэнергию в регионе, основные положения которого были описаны в [5, 6].

---

<sup>2</sup> Блокчейн - это децентрализованная структура данных, в которой цифровая запись событий (таких, как транзакция или генерация солнечной энергии) собирается и связывается с помощью криптографии в «блок» с меткой времени и другими событиями. Этот блок затем сохраняется вместе как «цепочка» на распределенных компьютерах. Любой участник блокчейна может прочитать его или добавить новые данные.

Особенность подхода состоит в имитации поведения потребителей и производителей электроэнергии в соответствии с их собственными интересами и оценке влияния этого поведения на спрос и цену электроэнергии в региональной энергосистеме.

Подход исходит из следующих основных положений: (1) региональная энергетическая система состоит из централизованной электрической сети и подключенных к ней потребителей, (2) централизованная электрическая сеть состоит из набора крупных источников электроэнергии (электростанции на угле, газе, атомные и проч.) с соответствующими технико-экономическими показателями (расход топлива, себестоимость и т.д.), (3) структура производства электроэнергии (доля отдельных электростанций в общем объеме) определяет значение ее стоимости в сети. Рассматриваются три категории потребителей: (s) стабильный (пассивный), который не может менять свое энергопотребление из-за технологических или иных особенностей, (a) активный, имеющий возможность изменять (снижать) энергопотребление, (p) просьюмер<sup>3</sup>, который, может управлять своим энергопотреблением, имеет возможности производства, хранения и поставки электроэнергии в централизованную сеть.

Алгоритм оценки влияния поведения потребителей на спрос в региональной энергосистеме подробно описан в [6] и позволяет итеративным путем, на основе изменения объемов использования электроэнергии активными потребителями и просьюмерами в ответ на изменение ее стоимости в энергосистеме, оценить максимально возможное снижение объемов использования энергии в энергосистеме.

Ниже описывается метод формирования стоимости электроэнергии в региональной системе на основе имитации поведения отдельного производителя. Метод базируется на оптимизации основных экономических показателей отдельной электростанции. В зависимости от ситуации в системе критерием оптимизации может быть: максимум прибыли, минимум себестоимости, максимум производства и др.

Формирование уровней стоимости электроэнергии в системе состоит в последовательной итерации согласования требуемых объемов ее потребления и возможностей производителей:

$$\sum_i N_i h_i = \sum_j V_j,$$

где  $N_i$  – установленная мощность электростанции  $i$ , кВт;  $h_i$  - число часов использования установленной мощности электростанции  $i$ , час;  $V_j$  - потребность в электроэнергии потребителя  $j$ , кВтч.

Каждый объект производства (электростанция) описывается в виде оптимизационной модели, исходными данными для которой являются:

- установленная мощность станции;
- удельные капиталовложения;
- число часов использования установленной мощности;
- норма амортизации;
- собственные нужды станции;
- удельный расход топлива на производство электроэнергии;

<sup>3</sup> producer + consumer

- стоимость топлива;
- штатный коэффициент;
- средняя заработная плата работников.

Каждая станция может работать в разных режимах и, соответственно, с разной себестоимостью производства электроэнергии. Себестоимость производства электроэнергии на КЭС, руб./кВт-ч, определяется по формуле:

$$S = I / (\mathcal{E} (1 - \alpha_{\text{сн}}))$$

где  $I$  – затраты на производство электроэнергии, руб.;  $\mathcal{E}$  – выработка электроэнергии, кВт-ч,  $\alpha_{\text{сн}}$  – коэффициент расхода электроэнергии на собственные нужды, %.

$$I = C_{\text{т}} (b / Q_{\text{н}}^{\text{р}}) N_{\text{у}} h_{\text{у}} + (1 + k_{\text{пр}}) [(n_{\text{ам}} + \beta_{\text{р}}) K + n_{\text{экс}} N_{\text{у}} \Phi]$$

где  $C_{\text{т}}$  – цена 1 т топлива, руб/т;  $b$  – удельный расход условного топлива на производство электроэнергии, г ут/кВтч;  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  – теплота сгорания натурального топлива, ккал/кг;  $N_{\text{у}}$  – установленная мощность станции, кВт;  $h_{\text{у}}$  – число часов использования установленной мощности, ч;  $k_{\text{пр}}$  – коэффициент расходов на прочие нужды, обычно принимается  $0,2 \div 0,3$  (большее значение коэффициента относится к КЭС небольшой мощности);  $K$  – капитальные вложения в КЭС, руб.,  $n_{\text{ам}}$  – средневзвешенная норма амортизационных отчислений (для КЭС при линейном способе начисления амортизации принимается равной  $0,035$ );  $\beta_{\text{рем}}$  – коэффициент, учитывающий долю затрат на ремонты, в долях от капитальных вложений, принимается равным  $0,04-0,05$ ;  $\Phi$  – среднегодовой фонд заработной платы одного работника (с учетом отчислений), руб./чел;  $n_{\text{экс}}$  – удельная численность персонала, чел./кВт.

Прибыль электростанции ( $m$ , руб.) рассчитывается по формуле

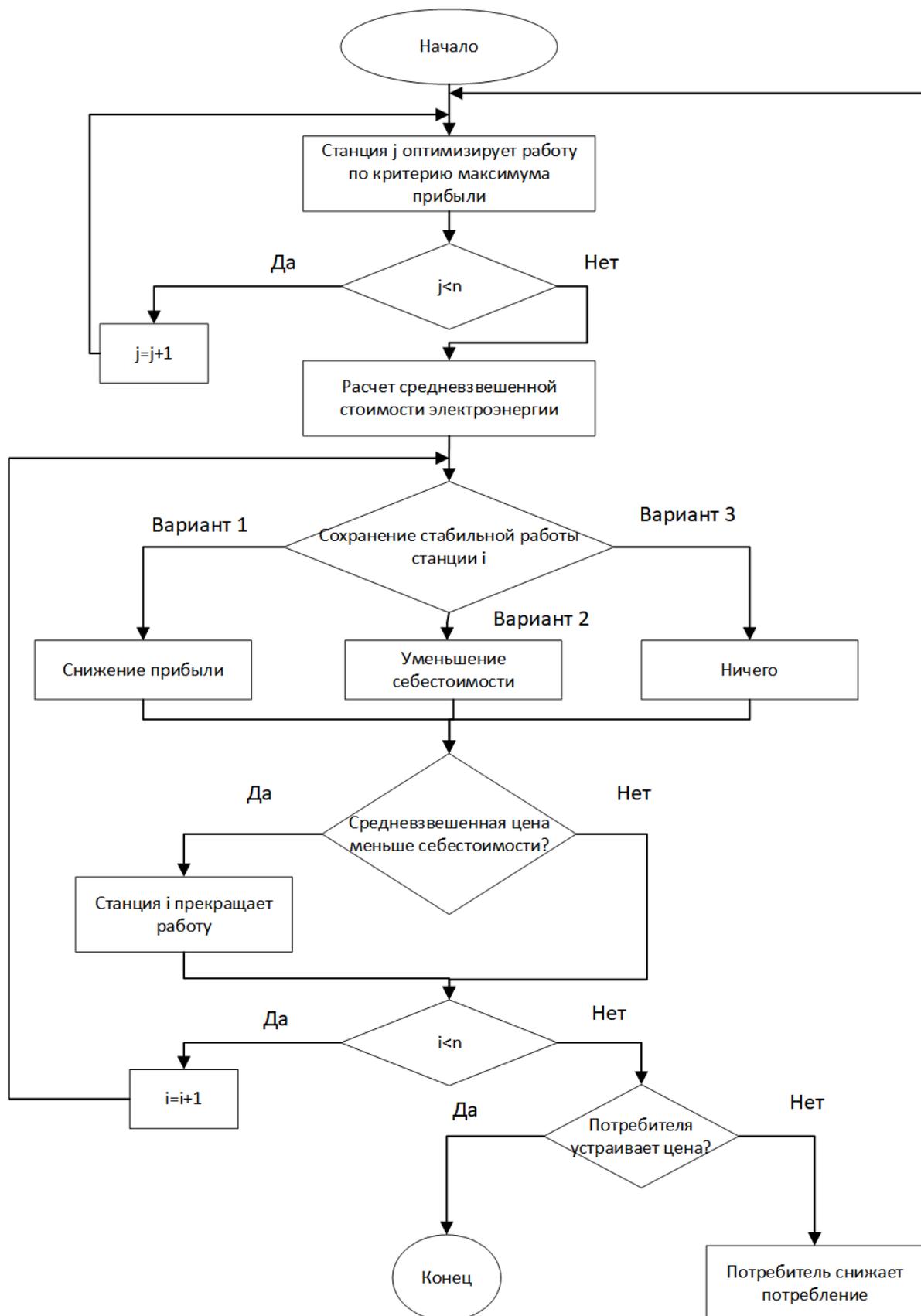
$$m = \mathcal{E} T - I$$

где  $T$  – средняя цена электроэнергии в сети, руб/кВтч,

Предусматривается двухуровневая схема оптимизации, т.е. оптимизируется работа каждой электростанции в отдельности и системы в целом. При этом отдельные электростанции могут оптимизировать свою работу по необходимому им критерию, а оптимизация системы осуществляется по критерию минимума средневзвешенной стоимости 1 кВт.ч.

Сначала определяется максимальная стоимость электроэнергии в сети, для чего все станции оптимизируют свою работу по критерию максимума прибыли. Рассчитывается средневзвешенная стоимость электроэнергии, которая является исходной для оценки влияния поведения потребителей на спрос (см., подробнее, [5]) и оценки ценовой эластичности спроса. Если эта стоимость электроэнергии не устраивает потребителей, они снижают нагрузку в системе и под новое ее значение производится следующий этап расчетов. Для сохранения стабильной работы, станции могут снизить прибыль или уменьшить себестоимость для сохранения прибыли. Часть станций могут оказаться не рентабельными в определенных условиях. Алгоритм формирования цены в региональной энергосистеме показан на рис. 1, а на рис. 2 представлен алгоритм оценки влияния поведения потребителей на спрос на электроэнергию в зависимости от ее стоимости.

Для моделирования прямых и обратных связей объектов в системе используется агентный подход. Модель каждой электростанции является отдельным агентом, решающим свои индивидуальные задачи в условиях энергосистемы. Агентный подход обеспечивает необходимый уровень детализации и абстракции [11, 12].



**Рис.1.** Алгоритм формирования стоимости электроэнергии в региональной энергосистеме на основе индивидуального поведения производителей

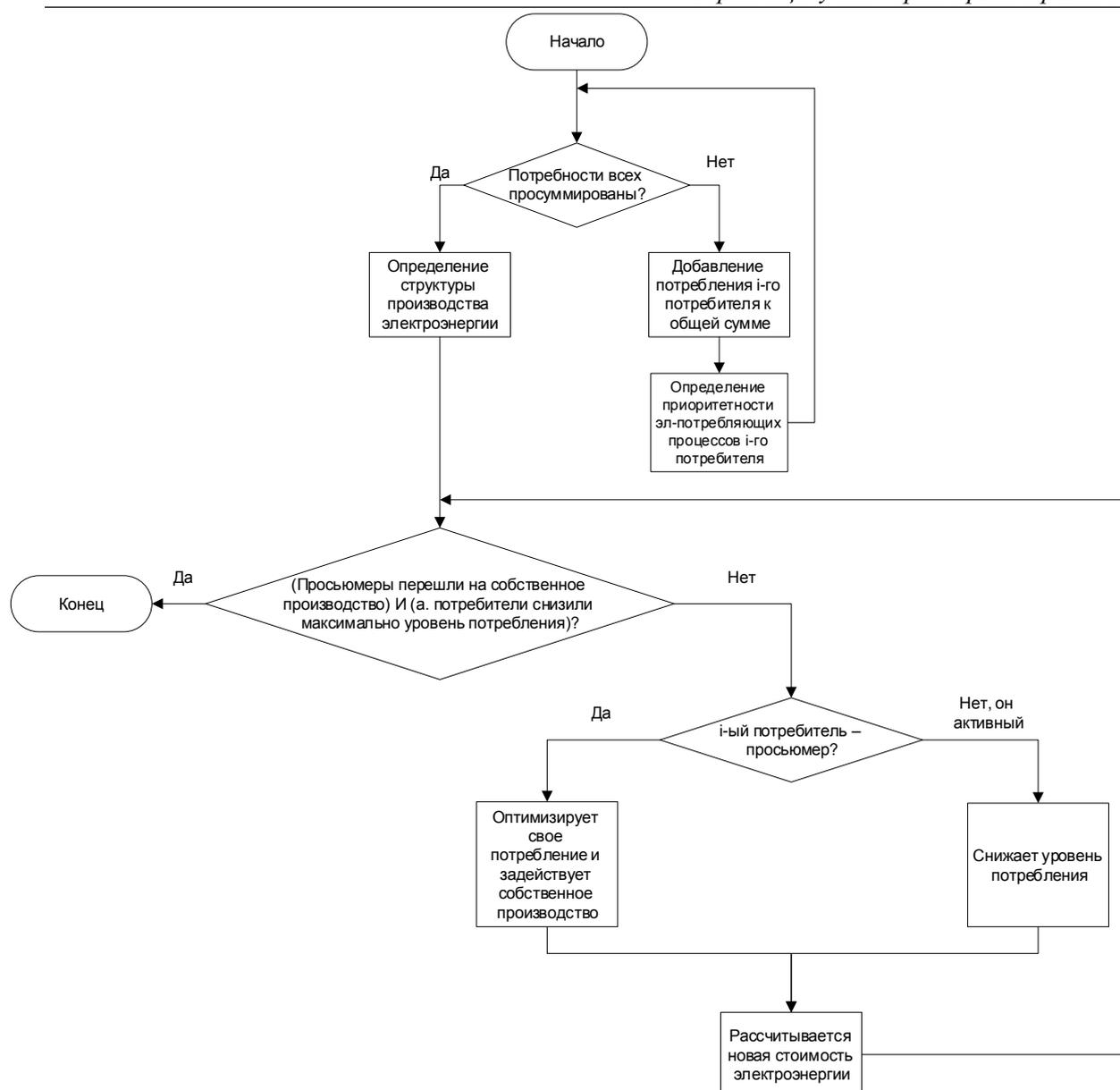


Рис. 2. Алгоритм оценки влияния поведения потребителей на спрос на электроэнергию в региональной энергосистеме

**Заключение.** Стремительное удешевление и распространение цифровых технологий в производстве энергии (в первую очередь, на основе возобновляемых источников энергии), появление интеллектуальных систем в управлении энергообъектами, изменение роли и места потребителей в энергетических системах кардинально меняют организационно-технологическую структуру энергетики, взаимосвязи между производителями и потребителями электроэнергии и влияют на спрос и цены на региональных энергетических рынках.

Учет этих новых факторов и взаимосвязей в методах прогнозирования спроса на энергоносители позволит улучшить качество прогнозов, повысить обоснованность перспективных вариантов развития ТЭК и стратегических решений в области энергетической и экономической безопасности страны и регионов.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания 17.5.2 (рег. № АААА-А17-117030310452-7) фундаментальных исследований СО РАН, отдельные результаты получены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-010-00204.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрианов Д.Л., Науменко Д.О., Старкова Г.С. Анализ методов и моделей энергопотребления на макроуровне // Научно-технические ведомости СПбГПУ. №4. 2012. Экономические науки. С. 215-219.
2. Андронов М. Распределенная генерация: будущее энергетики или тупик? Деловой журнал Инвест-Форсайт. Доступ: <https://www.if24.ru/budushhee-energetiki> / (дата обращения: 2.03.2020).
3. Блокчейн – новые возможности для производителей и потребителей электроэнергии? 2016. РwС. 48 с. Доступ:
4. [https://www.pwc.ru/ru/publications/blockchain/blockchain\\_opportunity-for-energy-producers%20and-consumers\\_RUS.pdf](https://www.pwc.ru/ru/publications/blockchain/blockchain_opportunity-for-energy-producers%20and-consumers_RUS.pdf) (дата обращения: 3.03.2020).
5. В России идет быстрое развитие распределенной энергетики. Но туда ли? Доступ: [https://kislod.life/question\\_answer/v\\_rossii\\_idet\\_bystroe\\_razvitie\\_raspredelennoy\\_energetiki\\_no\\_tuda\\_li/](https://kislod.life/question_answer/v_rossii_idet_bystroe_razvitie_raspredelennoy_energetiki_no_tuda_li/) (дата обращения: 2.03.2020).
6. Гальперова Е.В., Гальперов В.И. Моделирование поведения активного потребителя на основе агентного подхода // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. №4(8). С. 28-38.
7. Гальперова Е.В., Гальперов В.И., Локтионов В.И., Макагонова Н.Н. Применение интеллектуальных методов для моделирования влияния новых факторов в развитии энергетики на спрос на электроэнергию // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 16-29. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-02
8. Demand Response на розничных энергорынках в России может появиться уже в 2019 году. Доступ: [https://www.np-ace.ru/news/power\\_industry/1026/](https://www.np-ace.ru/news/power_industry/1026/) (дата обращения: 6.02.2020)
9. Калинина А. Блокчейн в энергетике: как по-новому продавать электричество. Доступ: <https://decenter.org/ru/blokcheyn-v-energetike-kak-po-novomu-prodavati-elektrichestvo> (дата обращения: 3.02.2020).
10. Куленов Н.С., Хасенов Ж.Х. Прогнозирование энергопотребления. – Алма-Ата: Наука, 1980.
11. Кулешов М., Рычков С. Концепция функционирования агрегаторов распределенных энергетических ресурсов в составе Единой энергетической системы России. Агрегаторы управления спросом на электроэнергию. Разработано АО «СО ЕЭС». Доступ:
12. [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/docs/dr\\_agregator\\_consept.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/docs/dr_agregator_consept.pdf) (дата обращения: 6.02.2020).
13. Макаров А.А. Модельно-информационная система для исследования перспектив энергетического комплекса России (SCANER). «Управление развитием крупномасштабных систем». М.: Физматлит. 2012.

14. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике. 2-е изд., доп. М.: Наука. 1983.
15. Методы исследования и управления системами энергетики / Л.С. Беляев, Н.И. Воропай, Ю.Д. Кононов и др. Новосибирск: Наука. 1987.
16. Распределенная генерация: потребительский тренд во время кризиса доверия к большой энергетике? Доступ: <https://www.eprussia.ru/epr/307-308/2223659.htm> (дата обращения: 3.03.2020).
17. Сорокин П. Блокчейн в энергетике: будущее или реальность? Доступ: <http://digitalsubstation.com/blog/2018/12/11/blokchejn-v-nbsp-energetike-budushhee-ili-nbsp-realnost/> (дата обращения: 3.2.2020).
18. Технология Блокчейн в энергетике. Доступ: <https://aiz.com/documentation/articles/blockchain-energy/> (дата обращения: 3.02.2020).
19. Филиппов С.П. Прогнозирование энергопотребления с использованием комплекса адаптивных имитационных моделей // Известия РАН. Энергетика. 2010. № 4. С. 41–55.
20. Хохлов А., Веселов Ф. Internet of Energy: как распределенная энергетика повлияет на безопасность, цены на электричество и экологию. Доступ: <http://www.forbes.ru/biznes/351485-internet-energy-kak-raspredelennaya-energetika-povliyaet-na-bezopasnost-ceny-na> (дата обращения: 03.02.2020).
21. Шапот Д.В. Опыт развития методологии и разработки управленческих моделей межотраслевого баланса / Д.В. Шапот, В.А. Малахов. М.: Издательский дом МЭИ, 2018. 176 с.
22. Юсуфов Р., Чаленко Е., Пердеро А., Кривошея Е. Блокчейн в электроэнергетике: ландшафт проектов и инвесторов. 2019. Сколково. 43 с. Доступ: [https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_RU\\_MINDSMITH\\_blockchain\\_investment\\_landscape2019.pdf](https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_RU_MINDSMITH_blockchain_investment_landscape2019.pdf) (дата обращения: 03.02.2020).
23. Daim T.U., Wang X., Cowan K. and Shott T. Technology roadmap for smart electric vehicle-to-grid (V2G) of residential chargers // Daim et al. Journal of Innovation and Entrepreneurship (2016) 5:15 DOI 10.1186/s13731-016-0043-y
24. Digitalization & Energy. International Energy Agency OECD/IEA, 2017, [Online]. Доступ: <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy> (дата обращения: 3.03.2020).
25. Energy Technology Perspectives 2017. Доступ: <https://www.iea.org> (дата обращения: 24.06.2019).
26. Finon, D. and B. Lapillonne, 1983, Long term forecasting of energy demand in developing countries. European Journal of Operations Research. 13(1). Pp. 12-28.
27. Grunewald Ph., Diakonova M. Flexibility, dynamism and diversity in energy supply and demand: A critical review // Energy Research & Social Science. 38 (2018). Pp. 58–66.
28. IRENA (2019), Innovation landscape brief: Electric-vehicle smart charging. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. 24 p.
29. Long range Energy Alternatives Planning (LEAP) System. Доступ: [https://openei.org/wiki/Long\\_range\\_Energy\\_Alternatives\\_Planning\\_\(LEAP\)\\_System](https://openei.org/wiki/Long_range_Energy_Alternatives_Planning_(LEAP)_System) (дата обращения: 3.03.2020)

30. Makkonen M., Patari S., Jantunen A., Viljainen S. Competition in the European electricity markets – outcomes of a Delphi study // Energy Policy. 44 (2012). Pp. 431–440.
31. O'Connor P., Jacobs M. Charging Smart. Drivers and Utilities Can Both Benefit from Well-Integrated Electric Vehicles and Clean Energy. May 2017. Доступ: [www.ucsusa.org/smartcharging](http://www.ucsusa.org/smartcharging) (дата обращения: 6.02.2020)
32. POLES: Prospective Outlook on Long-term Energy Systems. Доступ: <https://www.enerdata.net/solutions/poles-model.html>. (дата обращения: 3.03.2020)
33. Subhes C., Bhattacharyya Govinda R., Timilsina. Energy Demand Models for Policy Formulation. A Comparative Study of Energy Demand Models. The World Bank Development Research Group, Environment and Energy Team. March 2009.
34. Suganthi L., Anand A. Samuel. Energy models for demand forecasting – A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 16 (2012). Pp. 1223-1240.
35. The National Energy Modeling System: An Overview 2018. – U.S. Energy Information Administration. Washington, DC 20585. 75 p. Доступ:
36. [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/pdf/0581\(2018\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/pdf/0581(2018).pdf) (дата обращения: 03.02.2020)

---

**UDK 338.27:004.021**

**A METHODOLOGICAL APPROACH TO THE ASSESSMENT OF THE IMPACT OF INTELLIGENT ENERGY SYSTEMS DEVELOPMENT ON REGIONAL ELECTRICITY PRICE AND DEMAND**

**Elena V. Galperova**

PhD., Associate Professor, Senior Researcher. Department of "Energy Security",  
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,  
664033, Irkutsk, Lermontov st. Russia,  
e-mail: [galper@isem.irk.ru](mailto:galper@isem.irk.ru)

**Vasily I. Galperov**

PhD., Junior Researcher. Department of "Systems of Artificial Intelligence in Energy"  
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,  
664033, Irkutsk, Lermontov st. Russia,  
e-mail: [galperov@gmail.com](mailto:galperov@gmail.com)

**Abstract.** The development of digital technologies is changing the properties of power supply systems and blurring the line between power producers and consumers. This study presents the method of the cost of electricity formation in the regional power system, which serves as a component of the approach to assessing the impact of intelligent systems development on the demand for electricity in the region. Determining the cost of electricity in the system is essentially a matter of the consistent alignment of the required amount of electricity consumption with the capabilities of producers seeking to achieve their best economic performance. Each producer is described as an optimization model, which is a standalone agent in a multi-agent power system model.

**Keywords:** digital technology, smart grids, active consumer, optimization, agent-based approach, power demand, price.

**Acknowledgments.** The research was carried out under State Assignment 17.5.2 (reg. № AAAA-A17-117030310452-7) of the Fundamental Research of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, some results were obtained with partial funded by RFBR project № 20-010-00204.

### References

1. Andrianov D.L., Naumenko D.O., Starkova G.S. Analiz metodov i modelej energopotrebleniya na makrourovne [Analysis of methods and models of energy consumption at the macro level] // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskie nauki. = Scientific and technical statements of SPbSPU. Economics - 2012. № 4. Pp. 215-219 (in Russian).
2. Andronov M. Raspredeleonnaya generaciya: budushchee energetiki ili tupik? [Distributed generation: the future of energy or a dead end?] // Delovoj zhurnal Invest-Forsajt = Business magazine Invest-foresight. [Online]. Available at: <https://www.if24.ru/budushhee-energetiki/> (accessed: 2.03.2020). (in Russian)
3. Blokchejn – novye vozmozhnosti dlya proizvoditelej i potrebitelej elektroenergii? [Blockchain – new opportunities for power producers and consumers?] 2016. PwC. 48 p. [Online]. Available at: [https://www.pwc.ru/ru/publications/blockchain/blockchain\\_opportunity-for-energy-producers%20and-consumers\\_RUS.pdf](https://www.pwc.ru/ru/publications/blockchain/blockchain_opportunity-for-energy-producers%20and-consumers_RUS.pdf) (accessed: 3.03.2020). (in Russian)
4. V Rossii idet bystroye razvitiye raspredelelnoy energetiki. No tuda li? [Distributed energy is rapidly developing in Russia. But is it there?] [Online]. Available at: [https://kislород.life/question\\_answer/v\\_rossii\\_idet\\_bystro\\_e\\_razviti\\_e\\_raspredelelnoy\\_energetiki\\_no\\_tuda\\_li/](https://kislород.life/question_answer/v_rossii_idet_bystro_e_razviti_e_raspredelelnoy_energetiki_no_tuda_li/) (accessed: 2.03.2020).
5. Gal'perova E.V., Gal'perov 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. № 4(8). Pp. 28-38 (in Russian).
6. Gal'perova E.V., Gal'perov V.I., Loktionov V.I., Makagonova N.N. Primenenie intellektual'nyh metodov dlya modelirovaniya vliyaniya novyh faktorov v razvitii energetiki na spros na elektroenergiyu [Application of the methods of semantic and agent modeling for assessing of the impact of new factors in energy development on the demand for regional energy markets] // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2019. № 1 (13). Pp. 16-29. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-02 (in Russian).
7. Demand Response na roznichnyh energorynkah v Rossii mozhnet poyavit'sya uzhe v 2019 godu. [Demand Response on retail energy markets in Russia may appear as early as 2019] [Online]. Available at: [https://www.np-ace.ru/news/power\\_industry/1026/](https://www.np-ace.ru/news/power_industry/1026/) (accessed: 6.02.2020) (in Russian).
8. Kalinina A. Blokchejn v energetike: kak po-novomu prodavat' elektrichestvo. [Blockchain in energy: how to sell electricity in a new way] [Online]. Available at:

- <https://decenter.org/ru/blokcheyn-v-energetike-kak-po-novomu-prodavai-elektrichestvo> (accessed: 3.02.2020) (in Russian).
9. Kulenov N.S., Hasenov ZH.H. Prognozirovaniye energopotrebleniya [Forecasting energy consumption] Nauka = Science. Alma-Ata: 1980 (in Russian).
  10. Kuleshov M., Rychkov S. Konceptsiya funkcionirovaniya agregatorov raspredelennykh energeticheskikh resursov v sostave Edinoj energeticheskoy sistemy Rossii. Agregatory upravleniya sprosom na elektroenergiyu. Razrabotano AO «SO EES». [Concept of functioning of aggregators of distributed energy resources as part of the Unified energy system of Russia. Aggregators for managing electricity demand. Developed by JSC "so UES"] [Online]. Available at: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/docs/dr\\_agregator\\_concept.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/docs/dr_agregator_concept.pdf) (accessed: 6.02.2020). (in Russian)
  11. Makarov A.A. Model'no-informacionnaya sistema dlya issledovaniya perspektiv energeticheskogo kompleksa Rossii (SCANNER) [Model-information system for studying the prospects of the Russian energy complex (SCANNER)]. Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem = Managing the development of large-scale systems. Moscow: Fizmatlit. 2012 (in Russian).
  12. Melent'ev L.A. Sistemnye issledovaniya v energetike. 2-e izd., dop. [System studies in the energy sector. 2nd ed., additional] Nauka = Science. Moscow. 1983 (in Russian).
  13. Metody issledovaniya i upravleniya sistemami energetiki / L.S. Belyaev, N.I. Voropai, Yu.D. Kononov i dr. [Methods of research and management of energy systems]. Nauka = Science. Novosibirsk. 1987 (in Russian).
  14. Raspredelennaya generaciya: potrebitel'skij trend vo vremena krizisa doveriya k bol'shoj energetike? [Distributed generation: consumer trend during the crisis of confidence in centralized energy?] [Online]. Available at: <https://www.eprussia.ru/epr/307-308/2223659.htm> (accessed: 3.03.2020) (in Russian).
  15. Sorokin P. Blokchejn v energetike: budushchee ili real'nost'? [Blockchain in the power industry: future or reality?] [Online]. Available at: <http://digitalsubstation.com/blog/2018/12/11/blokchejn-v-nbsp-energetike-budushhee-ili-nbsp-realnost/> (accessed: 3.2.2020) (in Russian.)
  16. Tekhnologiya Blokchejn v energetike. [The Blockchain technology in the energy sector] Available at: <https://aiz.com/documentation/articles/blockchain-energy/> (accessed: 3.02.2020) (in Russian).
  17. Filippov S.P. Prognozirovaniye jenergopotrebleniya s ispol'zovaniem kompleksa adaptivnykh imitacionnykh modelej [Energy forecasting using a complex adaptive simulation models]// Izvestija RAN. Seriya Energetika = Bulletin of RAS. Energy Series. 2010. № 4. Pp. 41–55.(in Russian).
  18. Hohlov A., Veselov F. Internet of Energy: kak raspredelennaya energetika povliyaet na bezopasnost', ceny na elektrichestvo i ekologiyu [Internet of Energy: how distributed energy will affect security, electricity prices, and the environment] [Online]. Available at: <http://www.forbes.ru/biznes/351485-internet-energy-kak-raspredelennaya-energetika-povliyaet-na-bezopasnost-ceny-na> (accessed: 03.02.2020) (in Russian).
  19. SHapot D.V. Opyt razvitiya metodologii i razrabotki upravlencheskikh modelej mezhotraslevogo balansa [Experience in developing methodology and developing

- management models for cross-industry balance] / D.V. SHapot, V.A. Malahov. Izdatel'skij dom MEI = MEI publishing house, Moscow: 2018. 176 p. (in Russian).
20. YUusufov R., CHalenko E., Perdero A., Krivosheya E. Blokchejn v elektroenergetike: landshaft proektov i investorov [Blockchain in the power industry: the landscape of projects and investors], 2019. Skolkovo. 43 p. [Online]. Available at: [https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_RU\\_MINDSMITH\\_blockchain\\_investment\\_landscape2019.pdf](https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_RU_MINDSMITH_blockchain_investment_landscape2019.pdf) (accessed: 03.02.2020). (in Russian)
  21. Daim T.U., Wang X., Cowan K. and Shott T. Technology roadmap for smart electric vehicle-to-grid (V2G) of residential chargers // Daim et al. Journal of Innovation and Entrepreneurship (2016) 5:15 DOI 10.1186/s13731-016-0043-y.
  22. Digitalization & Energy. International Energy Agency OECD/IEA, 2017, [Online]. Available at: <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy> (accessed: 03.02.2020).
  23. Energy Technology Perspectives 2017. [Online]. Available at: <https://www.iea.org> (accessed: 24.06.2019).
  24. Finon, D. and B. Lapillonne, 1983, Long term forecasting of energy demand in developing countries, European Journal of Operations Research, 13(1), pp. 12-28.
  25. Grunewald Ph., Diakonova M. Flexibility, dynamism and diversity in energy supply and demand: A critical review // Energy Research & Social Science 38 (2018) 58–66.
  26. IRENA (2019), Innovation landscape brief: Electric-vehicle smart charging, International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. 24 p.
  27. Long range Energy Alternatives Planning (LEAP) System. [Online]. 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: 3.03.2020).
  28. Makkonen M., Patari S., Jantunen A., Viljainen S. Competition in the European electricity markets – outcomes of a Delphi study // Energy Policy 44 (2012). Pp. 431–440.
  29. O'Connor P., Jacobs M. Charging Smart. Drivers and Utilities Can Both Benefit from Well-Integrated Electric Vehicles and Clean Energy. May 2017. [Online]. Available at: [www.ucsusa.org/smartcharging](http://www.ucsusa.org/smartcharging) (accessed: 6.02.2020)
  30. POLES: Prospective Outlook on Long-term Energy Systems. [Online]. Available at: <https://www.enerdata.net/solutions/poles-model.html>. (дата обращения: 3.03.2020)
  31. Subhes C. Bhattacharyya Govinda R. Timilsina. Energy Demand Models for Policy Formulation. A Comparative Study of Energy Demand Models. The World Bank Development Research Group. Environment and Energy Team. March 2009.
  32. Suganthi L., Anand A. Samuel. Energy models for demand forecasting – A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012). Pp. 1223-1240.
  33. The National Energy Modeling System: An Overview 2018. – U.S. Energy Information Administration. Washington, DC 20585. 75 p. [Online]. 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: 03.02.2020)