

УДК 004.89:338

**ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НОВЫХ ФАКТОРОВ В РАЗВИТИИ ЭНЕРГЕТИКИ
НА СПРОС НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ**

Гальперова Елена Васильевна

К.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник отдела Взаимосвязей энергетики и экономики

e-mail: galper@isem.irk.ru

Гальперов Василий Ильич

К.т.н., младший научный сотрудник отдела Энергетической безопасности

e-mail: galperov@gmail.com

Локтионов Вадим Ильич

К.э.н., старший научный сотрудник отдела Взаимосвязей энергетики и экономики

e-mail: yadlok@mail.ru

Макагонова Надежда Николаевна

К.т.н., доцент, главный специалист по ИТ отдела Энергетической безопасности

e-mail: mak@isem.irk.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130

Аннотация. Смена парадигмы развития энергетики предъявляет новые требования к методологии прогнозирования спроса на региональных энергетических рынках. Наиболее важные перемены связаны с изменением роли потребителя, который становится активным и равноправным участником рынка электроэнергии, влияющим как на спрос и цены, так и уровень адаптивности энергосистемы. Невозможность формализации прямых и обратных связей потребителя и централизованной электросети и высокая их неопределенность обусловили использование семантического подхода и агентного моделирования. Построенные онтология и когнитивная модель региональной энергосистемы позволили выявить и описать причинно-следственные связи, возникающие в региональной энергосистеме при разных условиях ее функционирования. Разработанные на основе агентного подхода алгоритм и модели позволяют имитировать поведение потребителей в зависимости от разной ценовой ситуации и оценить возможности и силу их влияния на структуру и показатели развития энергосистемы при проведении будущих исследований.

Ключевые слова: интеллектуальные сети, активный потребитель, когнитивное моделирование, агентный подход, спрос на электроэнергию, цена.

Цитирование: 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

Введение. Долгосрочное прогнозирование спроса на разные виды энергоносителей является важным этапом при разработке программ и стратегий развития энергетики и

экономики страны и регионов, а также при принятии инвестиционных программ энергетическими компаниями.

Сегодня в мировой энергетике происходят революционные изменения, вызванные переходом к новому энергетическому укладу. Основными из них являются: повышение требований к качеству и надежности энергоснабжения потребителей, ужесточение экологических требований, опережающий рост спроса на электроэнергию по сравнению с другими энергоносителями, изменение роли потребителей в энергосистеме, вовлечение в оборот распределенных энергетических ресурсов (в т.ч. возобновляемых). По мнению специалистов, в новой энергетике главную роль будут играть интегрированные и объединённые на основе концепции интеллектуальной сети (Smart grid) электроэнергетические системы [7, 23].

Важной чертой энергетики будущего является ориентация на нужды конечного потребителя. Клиентоориентированный подход предъявляет новые требования к методологии долгосрочного прогнозирования спроса на энергоносители для исследования перспектив развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК). Ранее разработанные подходы основаны на концепции централизованного снабжения потребителей топливно-энергетическими ресурсами (ТЭР) и основное внимание уделяют уровню страны [12, 22, 28]. Энергопотребление регионов определяется, как правило, путем разнесения полученных объемов ТЭР по территории на основе региональной структуры потребления последнего доступного отчетного года с учетом принятых к реализации крупных инвестиционных проектов. Новые условия смещают акцент прогноза на сторону потребителей и региональный уровень. Именно здесь происходит согласование интересов отдельных производителей и потребителей энергии, формирующих конъюнктуру региональных энергетических рынков, которая, в свою очередь, способна повлиять на суммарный спрос на уровне страны, потребовать итеративной увязки регионального уровня и уровня страны и повлиять на структуру ввода генерирующих мощностей в ТЭК.

Активные потребители – важная часть интеллектуальной энергосистемы. Активным может быть любой потребитель (промышленные предприятия, транспорт, предприятия коммерческого сектора, домохозяйства и т.д.), способный самостоятельно управлять объемом централизованно получаемой электроэнергии на основе информации о ценах, надежности, качестве и других параметрах энергосистемы, а также влиять на них посредством продажи излишков производимой собственными мощностями электроэнергии [6, 14]. Такое поведение потребителей может не только влиять на спрос и цены на региональных энергетических рынках, но и способствовать повышению уровня адаптивности энергетических систем к меняющимся условиям развития.

Под адаптивностью энергетической системы понимается ее способность «подстраиваться» к изменяющимся внешним и внутренним условиям для достижения определенных целей, уровней, показателей, характеризующих стратегию ее функционирования и/или развития [13]. Например, обеспечение экономики страны или региона достаточным количеством и определенным качеством энергоресурсов, формирование рациональной структуры электрогенерирующих мощностей, достижение оптимального объема и направлений поставок энергоресурсов в регион или за его пределы и др. В увеличении адаптивности существующих энергетических систем страны заинтересованы как энергетические компании, стремящиеся к снижению рисков и

увеличению экономической эффективности, так и государство, стремящееся к повышению надежности, достаточности и ценовой приемлемости поставок энергоресурсов. Кроме того, свойство адаптивности может выступать одним из критериев оценки экономической эффективности инвестиционных проектов в энергетике и надежности функционирования энергетических систем [8].

Уровень адаптивности энергосистемы, кроме объемов затрат на приспособление ее к внешним и внутренним изменениям, определяется и количеством возможных, доступных и эффективных вариантов реакции системы на эти изменения: чем их больше, тем система более адаптивна при прочих равных условиях. Поведение потребителя как равноправного участника рынка электроэнергии будет способствовать повышению уровня адаптивности энергосистемы, поскольку создает возможности для сглаживания пиковых нагрузок, снижения системного резерва, оптимизации режимов работы электростанций и электроэнергетической сети, сокращения расходов и потерь топлива [2].

Обзор литературы. Моделирование поведения активного потребителя стало очень актуально в последние годы. 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 в работе [27] рассматриваются возможности уменьшения потребления наиболее энергоемкими приборами в пиковой части суточного графика нагрузки. В [24] планирование энергопотребления и собственного производства электроэнергии на сутки вперед осуществляется на основе оптимизации экономических параметров, а в [18] на основе технических параметров. В работе [26] оценивается сравнительная эффективность распределения собственно произведенной электроэнергии между электроприборами и зарядкой накопителя электроэнергии. В [19] предлагается подход к максимизации выгоды от рационализации энергопотребления для каждого потребителя из группы домохозяйств, имеющей один источник энергии, а в [21] для группы в целом. В [25] моделируется и анализируется как график нагрузки каждого потребителя, так и влияние их взаимодействия на напряжение в сети. Отечественные исследователи решают задачи оптимизации суточных графиков режимов работы приборов и оборудования и загрузки собственных генерирующих мощностей как для домохозяйств [3], так и для промышленных предприятий [4]. В [1] рассматриваются вопросы координации взаимодействия потребителей и электроснабжающих организаций при регулировании суточных графиков нагрузки. Перечисленные работы направлены на достижения удовлетворительных результатов отдельного потребителя или группы потребителей при управлении спросом в режиме реального времени. Для прогнозных исследований на долгосрочную перспективу подобные задачи не имеют существенного значения. Важной задачей прогнозов является ответ на вопрос: как оптимизация собственного потребления и производства электроэнергии активными потребителями может повлиять на общий уровень спроса на электроэнергию и структуру генерирующих мощностей в региональной электроэнергетической системе, а также ее адаптивность? Следует отметить, что изменение потребности в электроэнергии может вызвать изменение спроса на другие виды энергоресурсов на региональном энергетическом рынке.

Целью статьи является развитие методологии долгосрочного прогнозирования для учета влияния активных потребителей на спрос на региональном рынке электроэнергии и на уровень адаптивности энергосистемы. Основные трудности в анализе и моделировании этого

влияния обусловлены: (1) многомерностью и взаимосвязанностью формирования рыночных процессов; (2) высокой неопределенностью в показателях, факторах и взаимосвязях в развитии процессов; (3) нестационарным характером изменения процессов во времени. Для преодоления этих трудностей предлагается применить семантический подход и агентное моделирование для описания и моделирования сложных нелинейных прямых и обратных связей между активным потребителем и энергосистемой.

Предлагаемый метод исследования. Предположим, что региональная энергетическая система состоит из централизованной электрической сети и набора потребителей. Централизованная электрическая сеть состоит из набора крупных производителей электроэнергии (электростанции на угле, газе, атомные и проч.) со своими технико-экономическими показателями (расход топлива, себестоимость и т.д.). Изменение доли отдельных электростанций в общем объеме производства электроэнергии влияет на уровень ее цены в сети.

Для исследования влияния потребителей на спрос в региональной энергосистеме необходимо учитывать несколько их категорий (видов): (1) стабильный (пассивный), который не может менять свое энергопотребление из-за технологических или иных особенностей, (2) активный, имеющий возможность изменять (снижать) энергопотребление, (3) просьюмер¹, который, кроме управления спросом, имеет собственные источники производства и хранения электроэнергии, а также возможность ее поставки в централизованную сеть.

Объем использования электроэнергии на региональном рынке складывается из потребностей всех потребителей

$$V_r = V_s + V_a + V_p,$$

где V_s – потребность в электроэнергии стабильных потребителей, кВтч, V_a – потребность в электроэнергии активных потребителей, кВтч, V_p – потребность в электроэнергии просьюмеров, кВтч.

Стабильные потребители не имеют возможности влиять на ситуацию в региональной системе электроснабжения, потребляя постоянное количество энергии независимо от ее стоимости $V_s = \text{const}$.

Активный потребитель стремится оптимизировать свое потребление, меняя его объемы, и минимизировать расходы на энергоснабжение

$$V_{a_{\min}} \leq V_a \leq V_{a_{\max}},$$

$$V_a = \sum_{i=1}^n e_i h_i,$$

$$Z = c^t V_a \rightarrow \min,$$

где Z – величина затрат на оплату электроэнергии, c^t – стоимость электроэнергии при структуре производства t в централизованной сети, e_i – мощность отдельного электропотребляющего устройства (технологические установки, кондиционеры, обогреватели, водонагреватели, печи, лампы и др.) i -тых процессов потребления (силовые, охлаждение, отопление, освещение и т.д.), n – количество энергопотребляющих устройств, h_i – число часов использования отдельного устройства.

¹ producer + consumer

Для просьюмера необходимо найти такое сочетание объемов покупной и собственно произведенной энергии для удовлетворения текущей потребности, стоимость которой не должна превысить заданной величины затрат с учетом дохода от проданной в сеть электроэнергии. Возможны следующие основные ситуации:

- 1) вся потребность покрывается из централизованной сети

$$c^t V_p \leq \bar{Z},$$

- 2) потребность частично покрывается из централизованной сети, а частично собственным производством

$$\alpha c^t V_p + (1 - \alpha) V_p s_j - d \leq \bar{Z},$$

где α – доля покупной электроэнергии в суммарном потреблении, s_j – себестоимость собственного производства электроэнергии, d – доход от продажи электроэнергии в централизованную сеть.

- 3) потребитель полностью обеспечивает себя собственной электроэнергией

$$s_j N_j h_j - s_j V_p + d \leq \bar{Z},$$

где N_j – мощность всех собственных источников генерации j , h_j – число часов использования установленной мощности источника j .

При этом

$$\sum_j N_j h_j \geq V_p$$

В последних двух случаях возможный избыток электроэнергии потребитель может отправить в централизованную сеть и получить доход от продажи d .

Для описания взаимосвязей в региональной энергосистеме предлагается использовать возможности семантического моделирования. В условиях возрастающей неопределенности и невозможности формализованного представления взаимосвязей между объектами в системе, семантическое моделирование позволяет описать предметную область с помощью концептов и отношений между ними в виде онтологии [10] (рис. 1). Основой для ее построения является следующая информация:

- в регионе имеется централизованная электрическая сеть, состоящая из набора крупных источников электроэнергии со своими технико-экономическими показателями,
- целью централизованной системы является максимум производства,
- имеется ряд промышленных и непромышленных потребителей разного вида,
- потребители покупают электроэнергию из централизованной сети,
- целью активных потребителей является минимум затрат на используемую энергию,
- просьюмеры могут использовать собственные мощности по производству электроэнергии для удовлетворения своих потребностей, зарядки имеющихся аккумулирующих устройств или продажи в централизованную сеть.

В случае, когда стоимость электроэнергии в централизованной сети не устраивает активных потребителей и просьюмеров, они могут изменять объемы своего электропотребления. В этой ситуации возникают новые взаимосвязи, показанные в онтологии пунктирными линиями, описывающие снижение потребления и возможности использования собственной генерации для просьюмеров.

Для описания возникающих причинно-следственных связей построена когнитивная модель [10, 16, 20], представляющая собой ориентированный граф (рис. 2), вершинами в которой являются объекты региональной электроэнергетической системы, а ребрами - связи между ними.

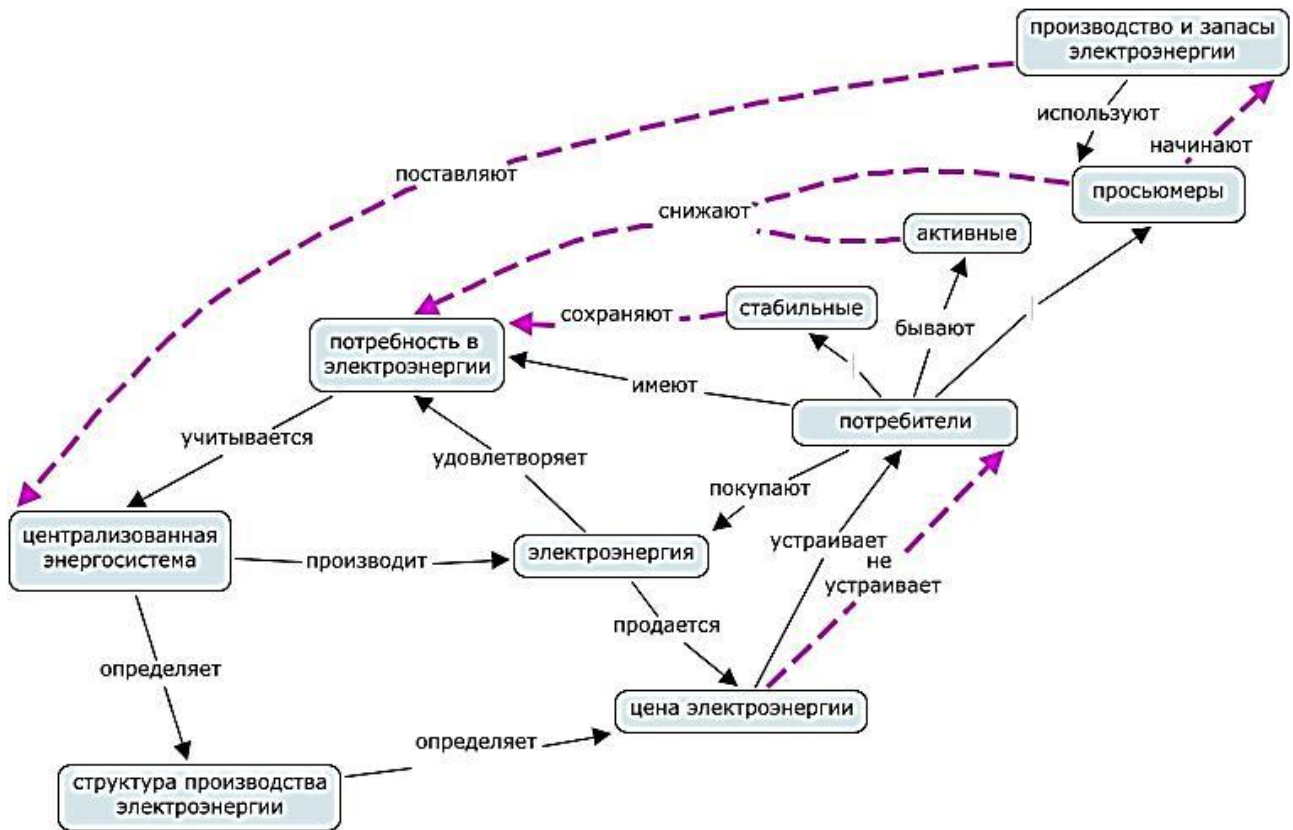


Рис. 1. Онтология региональной электроэнергетической системы при изменении стоимости электроэнергии

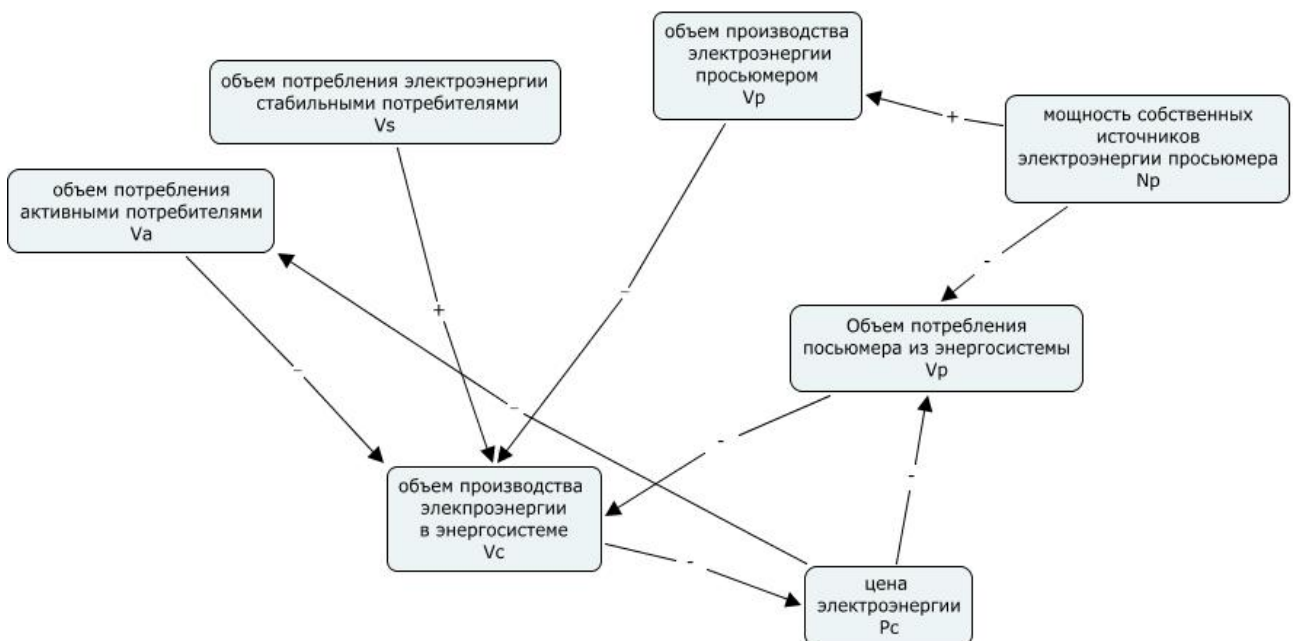


Рис. 2. Когнитивная модель региональной электроэнергетической системы

Алгоритм оценки влияния поведения потребителей на спрос в региональной энергосистеме состоит из следующих шагов (рис. 3):

- 1) находится максимально возможный уровень спроса на электроэнергию в региональной энергосистеме, как сумма потребности всех потребителей (потребность всех стабильных потребителей является неизменяемой частью объема спроса),
- 2) определяется приоритетность электропотребляющих процессов и объемы возможного снижения электропотребления для каждого активного потребителя и просьюмера,
- 3) для удовлетворения расчетного максимального объема спроса на электроэнергию определяется структура ее производства в централизованной сети на основе оптимизации по критерию минимальной стоимости 1 кВт.часа,
- 4) в соответствии с полученным значением цены электроэнергии в централизованной сети активные потребители и просьюмеры оптимизируют свое энергопотребление, определяется объем возможного его снижения и новый уровень энергопотребления для централизованной сети,
- 5) под этот уровень вновь производится оптимизация производственной структуры в сети и рассчитывается новая стоимость электроэнергии,
- 6) итеративные расчеты заканчиваются, когда просьюмерам становится выгодно полностью перейти на собственные источники производства электроэнергии, что соответствует минимальному уровню спроса на электроэнергию, получаемую из централизованной сети. Рассчитывается соответствующий этой ситуации объем спроса на электроэнергию, оценивается и анализируется величина снижения от максимального значения.

Реализация. Для моделирования всех объектов региональной энергосистемы, а также их взаимосвязей был выбран агентный подход, так как он позволяет моделировать самые сложные нелинейные прямые и обратные связи, использовать любой необходимый уровень детализации и абстракции [11, 12].

В настоящее время разрабатывается многоагентная модель централизованной электрической сети, в которой каждая электростанция представлена отдельным агентом с возможностью оптимизации собственных экономических показателей. В [5] представлен разработанный ранее, на основе типовой многоагентной системы [9], прототип многоагентной модели просьюмера, состоящий из набора агентов, каждый из которых описывает возможности функционирования отдельного энергопотребляющего и производящего устройства у потребителей. Контроль за работой каждого устройства-агента и согласование процессов их поведения осуществляет агент-менеджер, в которого закладываются описания всех возможных сценариев взаимосогласованного поведения собственных энергопотребляющих и энергопроизводящих устройств потребителя и взаимосвязей с централизованной электросетью. Развитие событий по каждому определенному сценарию описывается в виде событийных моделей с использованием аппарата Joiner-сетей [15].

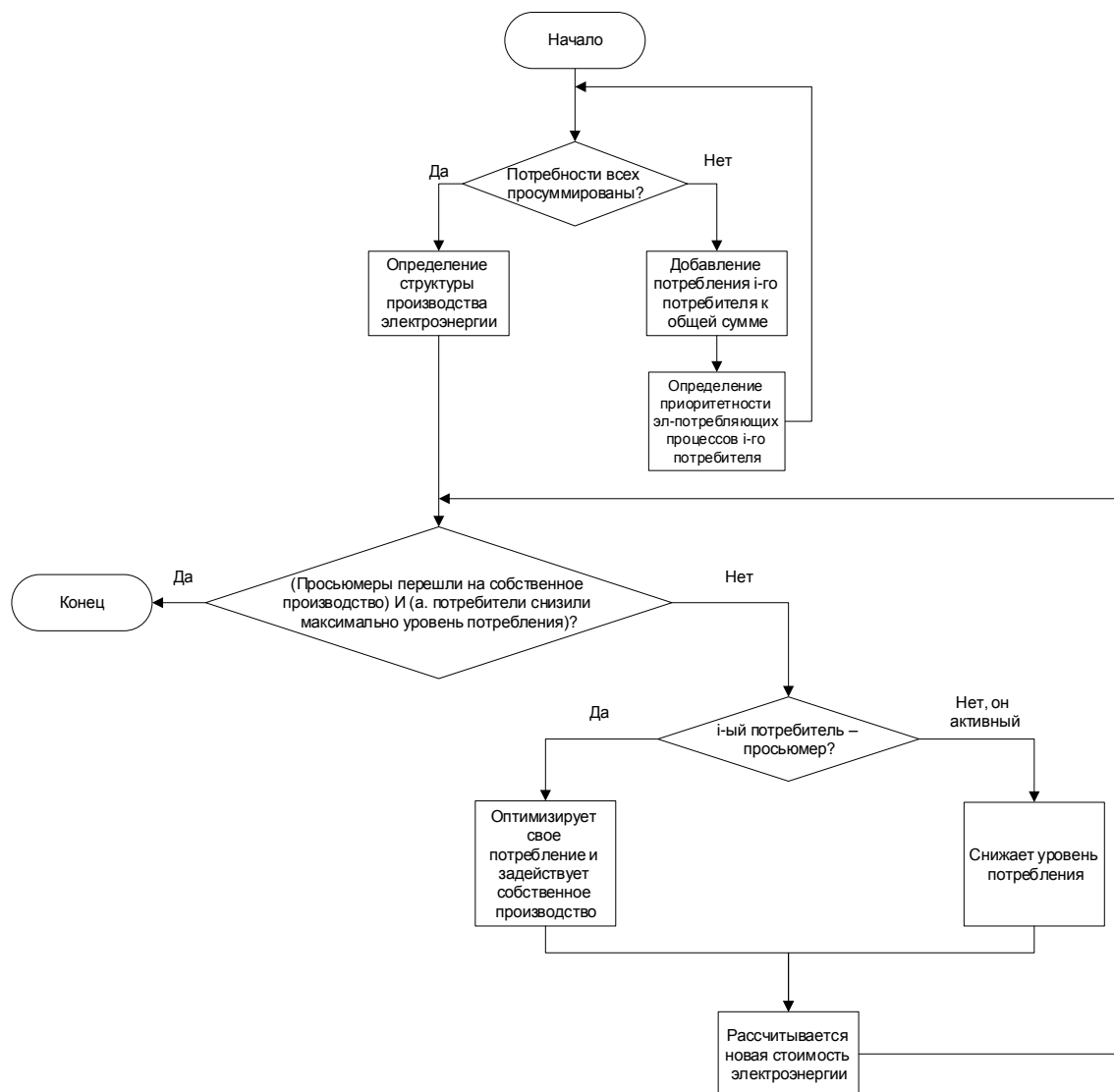


Рис. 3. Алгоритм для оценки влияния поведения активных потребителей на спрос в региональной электроэнергетической системе

Заключение. Развитие энергетики на основе концепции Smart grid, а также растущая неопределенность будущего страны и регионов предъявляют новые требования к методологии долгосрочного прогнозирования спроса на энергоносители для исследования вариантов развития ТЭК. Применение семантического подхода позволяет преодолеть трудности в моделировании развития энергосистемы, обусловленные невозможностью формализовать сложные прямые и обратные взаимосвязи потребителя и энергосистемы в условиях высокой их неопределенности.

В перспективе, способности потребителя производить и накапливать электроэнергию, а также менять объемы своего энергопотребления, могут влиять на уровень спроса и цену в региональной энергетической системе. Разработанные на основе агентного подхода алгоритм и модели позволяют имитировать поведение потребителей в зависимости от разных ситуаций в энергосистеме (уровня цен, надежности энергоснабжения, качества электроэнергии и др.) и оценить возможности и силу их влияния на структуру и условия функционирования энергосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзенберг Н.И., Шашкевич Е.В., Воропай Н.И. Координация взаимодействия электроснабжающей организации и активных потребителей при оптимизации суточных графиков нагрузки // Известия РАН. Энергетика. 2016. №3. С. 44–54.
2. Веселов Ф.В., Федосова А.В. Smart Grid - умный ответ на вызовы "умной" экономики. // Энергорынок. 2011. № 5. С. 52–58.
3. Волкова И.О., Губко М.В., Сальникова Е.А. Активный потребитель: задача оптимизации потребления электроэнергии и собственной генерации // Проблемы управления. 2013. № 6. С. 53–61.
4. Воропай Н.И., Стычински З.А., Козлова Е.В., Степанов В.С., Суслов К.В. Оптимизация суточных графиков нагрузки активных потребителей // Известия РАН. Энергетика. 2014. №1. С.84–90.
5. 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.
6. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SMART GRID. М.: ИАЦ Энергия. 2010. 208 с.
7. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью / Под ред. Е.В. Фортова, А.А. Макарова. М.: ОАО «ФСК ЕЭС». 2012. 235 с.
8. Локтионов В.И. Адаптивность вариантов развития энергетических систем как показатель энергетической безопасности // Экономический анализ: теория и практика. 2015. №40. С. 11–21.
9. Массель Л.В., Гальперов В.И. Разработка многоагентной системы оценивания состояния электроэнергетических систем с использованием событийных моделей // Наука и образование. 2015. №9. М.: МГТУ им. Баумана. Эл. №ФС77-4211. ISSN 1994-0448. DOI: 10.7463/0915.0811180.
10. Массель Л.В., Массель А.Г. Интеллектуальные вычисления в исследованиях направлений развития энергетики // Известия Томского политехнического университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. Т. 321. № 5. С. 135–141.
11. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд.: Пер. с англ. М.: Издательский дом "Вильямс". 2006. 1408 с.
12. Сидоренко В.Н. Красносельский А.В. Имитационное моделирование в науке и бизнесе: подходы, инструменты, применение // Бизнес-информатика. 2008. №2 (08). С. 52–57.
13. Смирнов В.А. Процессы адаптации в развитии энергетики. М.: Наука, 1983. 196 с.
14. Стенников В.А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы. Режим доступа: <http://isem.irk.ru/upload/iblock/cef/cef1938237b98ee723192b6676049d89.pdf> (дата обращения 4.04.2017).
15. Столяров Л.Н., Новик К.В. Joinet-сеть для моделирования взаимодействующих параллельных процессов // Моделирование процессов управления: Сб. научных трудов. Моск. физ.-тех. ин-т. М. 2004. С. 81–97.
16. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. М.: СИНТЕГ. 1998. 376 с.

17. Филиппов С.П. Прогнозирование энергопотребления с использованием комплекса адаптивных имитационных моделей // Известия РАН. Энергетика. 2010. № 4. С. 41–55.
18. 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. N 1. Pp. 120–133.
19. Amir-Hamed Mohsenian-Rad, Vincent W.S. Wong, Juri Jatskevich, Robert Schober, Alberto Leon-Garcia. Autonomous Demand Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid // IEEE Trans. on Smart Grid. 2010. Vol. 1. N 3. Pp. 320–331.
20. Axelrod R. Structure of Decision: the cognitive maps of political elites. Princeton Univ. Press. N.Y.: 1976. 395 p.
21. Bingnan Jiang, Yunsi Fei. Dynamic Residential Demand Response and Distributed Generation Management in Smart Microgrid with Hierarchical Agents // Energy Procedia. 2011. Vol. 12. Pp. 76–90.
22. Chateau B., Lapillonne B. The MEDEE Approach: Analysis and Long-term Forecasting of Final Energy Demand of Country // Energy Modelling Studies and Conservation: Proceedings of a Seminar of the United Nations Economics Commission for Europe, Washington D.C., 24-28 March 1980. Elsevier, 1982. Pp. 57–67.
23. Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations. International Energy Agency. Available at: www.iea.org/etp2017 (accessed 11.12.2018)
24. 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.
25. Kumarsinh Jhala, Balasubramaniam Natarajan, Anil Pahwa. Prospect Theory based Active Consumer Behavior Under Variable Electricity Pricing // IEEE Transactions on Smart Grid. PP(99):1-1 03/2018. 12 p. DOI:10.1109/TSG.2018.2810819 Available at: https://www.researchgate.net/publication/323501905_Prospect_Theory_based_Active_Consumer_Behavior_Under_Variable_Electricity_Pricing (accessed 11.12.2018)
26. Nikhil Gudi, Lingfeng Wang, Vijay Devabhaktuni. A demand side management based simulation platform incorporating heuristic optimization for management of household appliances // Electrical Power and Energy Systems. 2012. Vol. 43. Pp. 185–193.
27. 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.
28. The National Energy Modeling System / Industrial Demand Module Washington: Energy Information Administration. Available at: <http://www.eia.gov/forecasts/aeo/assumptions/pdf/industrial.pdf> (accessed 20.07.2018)

Благодарности. Исследование выполнено в рамках проекта государственного задания III.17.5.2, рег. № АААА-А17-117030310452-7 и при частичной финансовой поддержке РФФИ (проектов №17-06-00102 и № 18-010-00176)

UDK 004.89:338

**APPLICATION OF INTELLECTUAL METHODS FOR MODELING OF THE
INFLUENCE OF NEW FACTORS OF ENERGY SECTOR DEVELOPMENT
ON ELECTRICITY DEMAND**

Elena V. Galperova

PhD., Associate Professor, Leading Researcher. Department of Energy-Economy Interactions

e-mail: galper@isem.irk.ru

Vasily I. Galperov

PhD., Junior Researcher. Department of energy security

e-mail: galperov@gmail.com

Vadim I. Loktionov

PhD., Senior Researcher. Department of Energy-Economy Interactions

e-mail: vadlok@mail.ru

Nadezhda N. Makagonova

PhD., Associate Professor, IT Chief Specialist, Department of energy security

e-mail: mak@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

Abstract. Long-term forecasting of energy demand is the first and an important stage in the development of regional and national energy strategies and policies. Changes in the conditions of future energy development by spreading smart grid impose new requirements on the methodology of energy demand forecasting. Consumers are important component of the Smart Grid concept. In future consumers as equal energy market participants can form demand and prices and influence on level of energy system adaptability. Urgent task is to estimate the impact of consumer behavior on prospective electricity demand in a regional power system. The use of semantic approach allows us to overcome the difficulties in modeling the impact of consumer behavior that are associated with high uncertainty and impossibility to formalize grid-consumer interconnections. The developed algorithm and models based on the agent approach make it possible to assess the possibilities and the strength of consumer behavior effect on the structure and operating conditions of the regional power grid.

Keywords: controlled-load consumer, semantic approach, agent-based modeling, electricity demand, ontology, cognitive model, price.

References

1. Aizenberg N.I., Stashkevich E.V., Voropai N.I. Koordinatsiya vzaimodejstviya ehlektrosnabzhayushchej organizatsii i aktivnyh potrebitel'ej pri optimizatsii sutochnyh grafikov nagruzki [Coordination of the interaction between electricity supply company and active consumers in the optimization of daily load schedules] // Izvestiya RAN, Energetika = Bulletin of RAS. Energy Series. 2016. No 3. Pp. 44–54. (in Russian)

2. Veselov F.V., Fedosova A.V. Smart Grid – umnyj otvet na vyzovy "umnoj" jekonomiki [Smart Grid - smart answer to the challenges of the "smart" economy] // Jenergorynok = The energy market. 2011. No. 5. Pp. 52–58. (in Russian)
3. Volkova I.O., Gubko M.V., Salnikova E.A. Aktivnyj potrebel': zadacha optimizacii potrebleniya ehlektroehnergii i sobstvennoj generacii [Active consumer: problem of joint optimization of energy consumption and local generation] // Problemy upravlenij = Control Science. 2013. No 6. Pp. 53–61. (in Russian)
4. 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 of active consumers] // Izvestiya RAN, Energetika = Bulletin of RAS. Energy Series. 2014. No 1. Pp. 84–90. (in Russian)
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 = Informational and mathematical technologies in science and management. 2017. No 4 (8). Pp. 28–38.
6. Kobec B.B., Volkova I.O. Innovacionnoe razvitie jelektrojenergetiki na baze koncepcii SMART GRID [Innovative development of the electric power industry on the basis of the SMART GRID concept] // Moskva = Moscow. Izdatel'skij centr "Jenergija" = Publishing center «Energy». 2010. 208 p. (in Russian)
7. Koncepcija intellektual'noj jelektrojenergeticheskoj sistemy Rossii s aktivno-adaptivnoj set'ju. [The concept of an intelligent electric power system in Russia with an active-adaptive network] / Pod red. E.V. Fortova, A.A. Makarova // Moskva = Moscow. OAO «FSK EJeS» = JSC FGC UES. 2012. 235 p. (in Russian)
8. Loktionov V.I. Adaptivnost' variantov razvitiya ehnergeticheskikh sistem kak pokazatel' ehnergeticheskoj bezopasnosti [Adaptability of energy systems development options as an indicator of energy security] // EHkonomicheskij analiz: teoriya i praktika = Economic Analysis: Theory and Practice. 2015. No 40. Pp. 11–21. (in Russian)
9. Massel L.V., Galperov V.I. Razrabotka mnogoagentnoj sistemy ocenivaniya sostojaniya jelektrojenergeticheskikh sistem s ispol'zovaniem sobytijnyh modelej [Development of a multi-agent system for assessing the state of electric power systems using event models] // Nauka I obrazovanie = Science and Education. Moskva = Moscow. MGTU im. Baumana = MSTU them. Bauman. Jel. 2015. No 9. El.№FS77-4211. ISSN 1994-0448. DOI: 10.7463/ 0915. 0811180 (in Russian)
10. Massel L.V., Massel A.G. Intellektual'nye vychisleniya v issledovaniyah napravlenij razvitiya ehnergetiki [Intelligent computing in areas of energy development studies] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Management, computer facilities and informatics. 2012. vol. 321. No 5. Pp. 135–141. (in Russian).
11. Rassel S., Norvig P. Iskusstvennyj intellekt: sovremennyj podhod [Artificial intelligence: a modern approach]. 2-e izd.: Per. s angl.=2nd ed.: Trans. from English. Moskva = Moscow. Izdatel'skij dom "Vil'jams" = Publishing house "Williams". 2006. 1408 p. (in Russian)

12. Sidorenko V.N. Krasnosel'skij A.V. Imitacionnoe modelirovanie v nauke i biznese: podhody, instrumenty, primenenie [Simulation modeling in science and business: approaches, tools, application] // *Biznes-informatika = Business Informatics*. 2008. No 2(08). Pp. 52–57 (in Russian)
13. Smirnov V.A. Processy adaptacii v razvitii ehnergetiki [Adaptation processes in energy development] Moskva = Moscow. Nauka = Science. 1983. 196 p.
14. Stennikov V.A. Integrirovannye intellektual'nye jenergeticheskie sistemy [Integrated Intelligent Power Systems]. Available at: <http://isem.irk.ru/upload/iblock/cef/cef1938237b98ee723192b6676049d89.pdf> (accessed 4.04.2017) (in Russian)
15. Stoljarov L.N., Novik K.V. Joiner-set' dlja modelirovanija vzaimodejstvujushhijh parallel'nyh processov [Joiner-network for modeling interacting parallel processes] // *Modelirovanie processov upravlenija: Sb. Nauchnyh trudov = Modeling of control processes: Sat. Scientific works*. Moskva = Moscow. Mosk. fiz.-teh. in-t. = Fiz.-tech.in-t. 2004. Pp. 81–97 (in Russian)
16. Trahtengerc Eh.A. Komp'yuternaya podderzhka prinyatiya reshenij [Computer support of decision-making] Moskva=Moscow. SINTEG. 1998. 376 p.
17. Filippov S.P. Prognozirovanie jenergotreblenija s ispol'zovaniem kompleksa adaptivnyh imitacionnyh modelej [Energy forecasting using a complex adaptive simulation models] // *Izvestija RAN. Seriya Energetika = Bulletin of RAS. Energy Series*. 2010. No. 4. Pp. 41–55. (in Russian).
18. 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. N 1. Pp. 120–133.
19. Amir-Hamed Mohsenian-Rad, Vincent W.S. Wong, Juri Jatskevich, Robert Schober, Alberto Leon-Garcia. Autonomous Demand Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid // *IEEE Trans. on Smart Grid*. 2010. Vol. 1. N 3. Pp. 320–331.
20. Axelrod R. *Structure of Decision: the cognitive maps of political elites*. Princeton Univ. Press. N.Y.: 1976. 395 p.
21. Bingnan Jiang, Yungsi Fei. Dynamic Residential Demand Response and Distributed Generation Management in Smart Microgrid with Hierarchical Agents // *Energy Procedia*. 2011. Vol. 12. Pp. 76–90.
22. Chateau B., Lapillonne B. The MEDEE Approach: Analysis and Long-term Forecasting of Final Energy Demand of Country // *Energy Modelling Studies and Conservation: Proceedings of a Seminar of the United Nations Economics Commission for Europe, Washington D.C., 24–28 March 1980*. Elsevier, 1982. Pp. 57–67.
23. *Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations*. International Energy Agency. Available at: www.iea.org/etp2017 (accessed 11.12.2018)
24. 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.

25. Kumarsinh Jhala, Balasubramaniam Natarajan, Anil Pahwa. Prospect Theory based Active Consumer Behavior Under Variable Electricity Pricing // IEEE Transactions on Smart Grid. PP(99):1-1 03/2018. 12 p. DOI:10.1109/TSG.2018.2810819 Available at: https://www.researchgate.net/publication/323501905_Prospect_Theory_based_Active_Consumer_Behavior_Under_Variable_Electricity_Pricing (accessed 11.12.2018)
26. Nikhil Gudi, Lingfeng Wang, Vijay Devabhaktuni. A demand side management based simulation platform incorporating heuristic optimization for management of household appliances // Electrical Power and Energy Systems. 2012. Vol. 43. Pp. 185–193.
27. 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.
28. The National Energy Modeling System / Industrial Demand Module Washington: Energy Information Administration. Available at: <http://www.eia.gov/forecasts/aeo/assumptions/pdf/industrial.pdf> (accessed 20.07.2018)

Acknowledgments. The article is supported by state task III.17.5.2, № AAAA-A17-117030310452-7 and the Russian Foundation for Basic Research (project №17-06-00102 and № 18-010-00176)