© В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко, Г.С. Майоров

(cc) BY

УДК 621.311.001.57 **DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-6-29-42**

ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПОДХОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко, Г.С. Майоров

Институт систем энергетики им. Мелентьева, Иркутск, Россия
mayorovgs@isem.irk.ru

Резюме: *В настоящее время управление развитием и функционированием энергетическими системами происходит раздельно по локальным системам и задачам. Традиционно рассматриваемые энергетические системы объединяют крупные энергоисточники, такие как гидро-, теплоэлектростанции, теплоэлектроцентрали, котельные и распределенные по большой территории электрические и трубопроводные сети. Новые тенденции в энергетике обуславливают новую ЦЕЛЬ. Необходимость пересмотра принципов построения энергетических систем и создания интегрированных энергетических систем. Объединение существующих энергетических систем в единую интегрированную систему с множеством взаимосвязанных и координирующихся элементов может способствовать реализации новых функциональных возможностей, применению более совершенных технологий в эксплуатации и активному участию потребителей с распределенной генерацией в процессе энергоснабжения. МЕТОДЫ. Для исследования интегрированных энергетических систем предлагается использовать мультиагентный подход, который является одним из перспективных направлений исследования сложных систем. Данный подход используется во многих предметных областях для исследования систем, включающих большое количество элементов со сложным поведением. К подобным системам относятся интегрированные энергетических системы, моделирование и анализ которых на базе мультиагентного подхода формируется множеством взаимосвязанных агентов, обменивающихся друг с другом различными данными. РЕЗУЛЬТАТЫ. По результатам исследований предложена активная структура мультиагентной системы для расчета и оптимизации интегрированных энергетических систем и, учитывающая их основные особенности и свойства, в рамках которой определены агенты мультиагентной системы, их цели и задачи. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. На базе этой структуры разработана модель, позволяющая моделировать интегрированные энергетические системы. Проведенные эксперименты с помощью разработанной модели, показали ее работоспособность, практическую применимость и перспективность для дальнейшего развития.*

Ключевые слова: *мультиагентные системы,интегрированные энергетические системы, мультиагентный подход,моделирование систем энергетики,электроэнергия, тепловая энергия.*

Благодарности: *Статья подготовлена по результатам работы, выполненной в рамках проекта государственного задания 17.4.1 (рег. № АААА-А17-117030310432-9) фундаментальных исследований СО РАН.*

Для цитирования: Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Майоров Г.С. Применение мультиагентного подхода для моделирования интегрированных энергетических систем // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 29-42. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-29-42.

APPLICATION OF THE MULTIAGENT APPROACH FOR MODELING INTEGRATED ENERGY SYSTEMS

VA. Stennikov, EA. Barakhtenko, GS. Mayorov

Melentiev energy systems institute, Irkutsk, Russia
mayorovgs@isem.irk.ru

Abstract: *Currently, operation control and expansion planning of energy systems occurs separately for local systems and tasks. Traditionally, the considered energy systems unite large energy sources, such as hydro, thermal power plants, combined heat and power plants, boiler plants and electric and pipeline networks distributed over a large area. New trends in the energy sector necessitate a revision of the principles of the construction of energy systems and creating integrated energy systems. THE PURPOSE. Combining existing energy systems into a single integrated system with many interconnected and coordinating elements can contribute to the implementation of new functionalities, the use of more advanced technologies in operation and the active participation of consumers with distributed generation in the energy supply process. METHODS. To study integrated energy supply systems, it is proposed to use a multiagent approach, which is one of the promising areas for the study of complex systems. This approach is used in many subject areas to study systems involving a large number of elements with complex behavior. Such systems include integrated energy systems, the modeling and analysis of which on the basis of a multiagent approach is formed by a multitude of interconnected agents that exchange various data with each other. RESULTS. Based on the research results, the active structure of a multiagent system is proposed for the calculation and optimization of integrated energy systems and, taking into account their main features and properties, in the framework of which the agents of the multiagent system, their goals and objectives are determined. CONCLUSIONS. Based on this structure, a model has been developed that allows modeling integrated energy systems. The experiments carried out using the developed model showed its efficiency, practical applicability and prospects for further development.*

Keywords**:** *multiagent systems; integrated energy systems; multiagent approach; energy systems modeling; electrical energy; thermal energy.*

Acknowledgments: *The research was carried out under State Assignment, Project 17.4.1 (reg. no. AAAA-A17-117030310432-9) of the Fundamental Research of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.*

For citation: Stennikov VA, Barakhtenko EA, Mayorov GS. Application of the multiagent approach for modeling integrated energy systems. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):29-42. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-29-42.

Введение

Энергетика развитых стран мира переживает в настоящее время смену технологической парадигмы. Она предполагает повышение роли потребителей, снижение приоритета централизованного управления и поиск компромиссных решений. С увеличением количественного состава технологий (отопление, кондиционирование, электричество, современное аудио- и видеооборудование, системы доставки информации и многое другое) усиливается взаимосвязь отдельных систем, растет объем обмениваемой информацией, усложняется управление системами. Для преодоления этих проблем в передовых странах была предложена идея интеграции и интеллектуализации энергетических систем и уже начался процесс их реализации в виде пилотных проектов [1-2]. Интегрированные энергетические системы (ИЭС) развиваются в ряде Европейских стран, таких как: Германия, Дания, Нидерланды, Финляндия, Франция, Швеция [3], а также Китай [4]. Эти страны определили полигоны в виде отдельных городов, где реализуются пилотные проекты ИЭС. Наиболее масштабным является проект «Объединенные эффективные крупномасштабные интегрированные городские системы» по созданию интеллектуальных систем электро-, тепло/хладоснабжения, который реализуется в пяти крупных городах Европы: Гетеборге, Женеве, Кельне, Лондоне, Роттердаме.

Объединение систем разного уровня как по типу используемой энергии, так и по территориальному признаку в единую интегрированную систему с большим количеством

координирующихся между собой элементов может обеспечить реализацию новых функциональных возможностей недоступных при раздельном управлении, повысить надежность всей системы, позволит применить более совершенные технологии эксплуатации и обеспечит возможность потребителям с распределенной генерацией активно участвовать в процессе своего энергоснабжения. Для исследования ИЭС предлагается использовать мультиагентный подход, который является одним из перспективных направлений исследования сложных систем [5-6].

Особенности интеграции и мультиагентного подхода

Основными целями технологической интеграции и интеллектуализации энергетических систем являются достижение более высокого уровня управления с целью обеспечения высокого уровня комфорта в жилых, общественных и производственных зданиях, обеспечения экономичности энергоснабжения, снижения негативного воздействия на окружающую среду [1-2,7]. Интеграция систем в единую метасистему повышает уровень ее управляемости, при этом увеличивается количество и интенсивность взаимосвязей и взаимодействия между отдельными элементами.

Основные принципы создания ИЭС [1-2,7]:

– Переход от функционирования нескольких разрозненных систем к общей метасистеме с единым управлением.

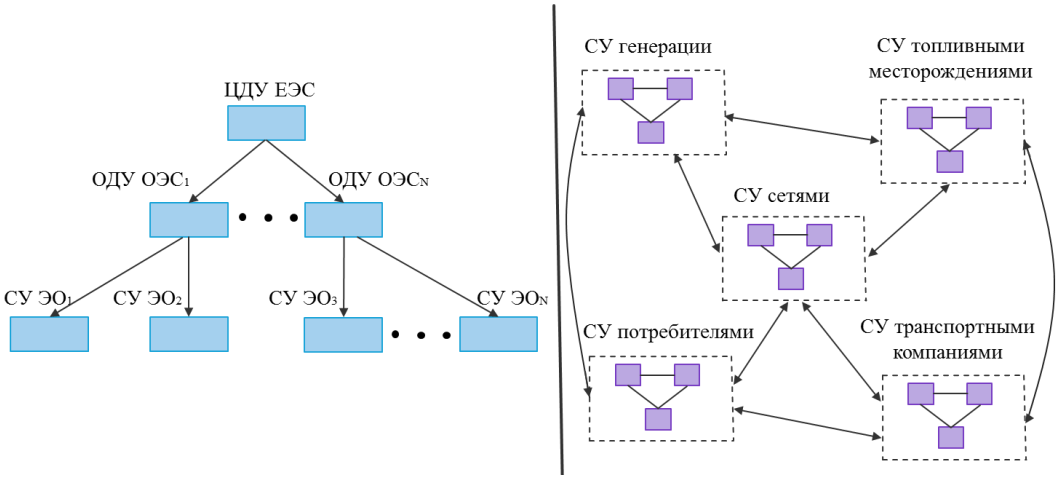
– Эмерджентность, выраженная в приобретении метасистемой новых свойств, не присущих ее элементам.

– Взаиморезервирование систем в процессе их функционирования.

– Переход от вертикально-подчиненного управления к мультиагентному управлению (от вертикали к горизонтали), когда каждая система, ее элемент, имеет своего агента, который принимает воздействие от внешней среды и осуществляет реакцию на это воздействие. Решения принимаются и реализуются независимыми центрами.

– Интеграция управления режимами ИЭС посредством сетевой (распределенной) координации мониторинга.

На рис. 1 показана традиционная иерархическая схема построения энергетической системы и схема построения интеллектуальной ИЭС.



а) *б)*

Рис. 1. Схемы построения энергетических систем:
а) традиционная иерархическая схема построения энергетической системы: ЦДУ ЕЭС – центральное диспетчерское управление единой энергетической системы; ОДУ ОЭС – оперативно-диспетчерское управление объединенных энергосистем; СУ ЭО – системы управления энергообъединений; *б)* схема построения интеллектуальной интегрированной энергетической системы: СУ – системы управления

Представленные на рис. 1 традиционная схема (*а*) построения энергетической системы имеет вертикально-интегрированную систему управления энергетикой, интегрированная (*б*) основана на горизонтальной схеме управления.

Мультиагентный подход находит широкое применение в таких областях как распределенное решение сложных задач, совмещенное проектирование изделий, реинжиниринг бизнеса и построение виртуальных предприятий, имитационное моделирование интегрированных производственных систем и электронная торговля [8-10]. Принципиальная структура мультиагентной системы (МАС) представлена на рис. 2. Для моделирования и исследования ИЭС мультиагентный подход представляет наибольший

интерес, т.к. он позволяет наиболее точно и детально исследовать механизмы взаимодействия и координации элементов ИЭС.

В основе мультиагентного подхода лежит понятие мобильного программного агента, который реализован и функционирует как самостоятельная специализированная компьютерная программа или как элемент искусственного интеллекта. Суть мультиагентных технологий заключается в новом методе решения задач. В отличие от классического способа, когда осуществляется поиск некоторого четко определенного (детерминированного) алгоритма, позволяющего найти наилучшее решение проблемы, в мультиагентных технологиях решение получается в результате взаимодействия множества самостоятельных целенаправленно действующих программных модулей (агентов) [11-12].

Под агентом понимается любая сущность, которая находится в некоторой среде, воспринимает ее посредством сенсоров, получая данные, которые отражают события, происходящие в среде, интерпретирует эти данные и действует на неё посредством различных воздействий. Таким образом, определяются четыре исходных фактора, образующих агента: среда, восприятие, интерпретация, действие [12-13].

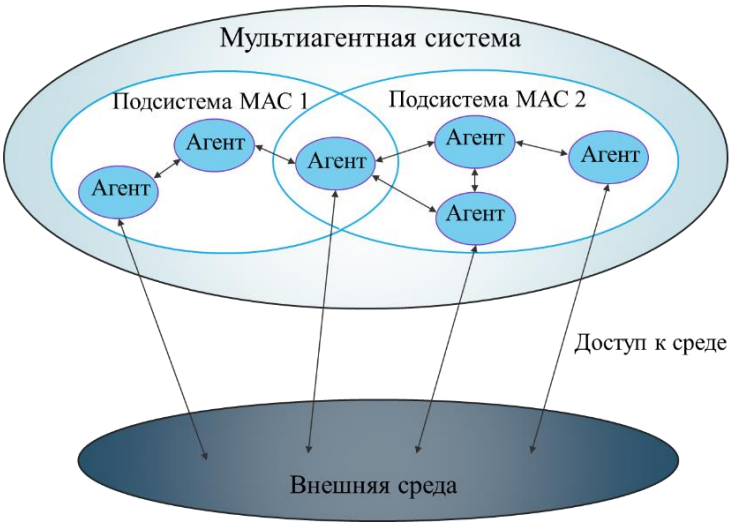


Рис. 2. Принципиальная структура мультиагентной системы

Мультиагентный подход для исследования ИЭС предполагает решение следующих групп задач:

– создание систем сбора технологической информации, которые предназначены для накопления необходимых данных об ИЭС и для формирования решения по управлению функционированием и развитием системы на основе полученной информации;

– создание структурированной информационно-технологической среды, т.е. создание единой информационной среды для ИЭС, в которой каждый элемент имеет свои задачи, функции, ограничения и связи с другими элементами;

– разработку программного обеспечения для быстрой обработки данных в ИЭС, чтобы на основе полученной информации система могла выработать наиболее оптимальное решение;

– реализацию быстрого технологического управления ИЭС, т.е. система должна отличаться гибкостью и маневренностью, быстро реагировать на сложные и аварийные ситуации.

Структура разрабатываемой мультиагентной системы (МАС) отражает особенности схемы построения интеллектуальной ИЭС. Она включает вертикальные и горизонтальные связи между элементами системы, в отличие от традиционной иерархической схемы, где взаимодействие происходит вертикально, строго сверху вниз. В то же время в разрабатываемой МАС существует общий координирующий орган, который содержит информацию о всей системе и отслеживает ее параметры, чтобы они не выходили за заданные ограничения.

Структура мультиагентных систем для исследования интегрированных энергетических систем

Структура МАС, принятая для исследования ИЭС, представлена на рис. 3. Все объекты в рассматриваемой ИЭС делятся на потребителей, сети и источники энергии, каждый объект имеет своего агента, отражающего его поведение в системе, связи с другими агентами, характеристики, параметры и индивидуальные ограничения. Кроме того, существует общий агент (сетевой агент), принимающий заявки на энергию от потребителей

и пересылающий их источникам энергии и сетям, имеющим возможности участвовать в энергоснабжении потребителя. Сетевой агент имеет ограничения и отражает нормативные параметры всей ИЭС и при необходимости может отдать соответствующие команды для поддержания нормального режима работы ИЭС.

Взаимодействие агентов в ИЭС выполняется через прямые и обратные связи между ними. Агенты-потребителей формируют заявки на необходимое количество энергии и отправляют их сетевому агенту. В свою очередь сетевой агент распределяет эти заявки между соответствующими агентами-источников и агентами-сетей, которые могут участвовать в снабжении потребителей. Получив заявки на энергию, агенты-источников и агенты-сетей проверяют необходимые условия и ограничения (у каждого объекта системы есть свои ограничения, например, ограничения по генерируемой мощности или ограничения по пропускной способности сети), затем они начинают взаимодействовать между собой и сетевым агентом (отправляя сообщения и параметры) и вырабатывают наиболее оптимальное решение по снабжению потребителей. В случае, если найти оптимальное решение не получается, то сетевой агент может сформировать новый запрос и перераспределить один тип энергии путем преобразования его в другой, например, если для покрытия спроса недостаточно производимой электрической энергии, то можно через специально задействованные резервные генераторы (работающие на газе или использующие энергию пара) получить необходимое количество электроэнергии и наоборот, используя электроэнергию, можно через специальные электрические бойлеры получить недостающую тепловую энергию. В табл. 1 более подробно расписаны цели, задачи и ограничения агентов каждого типа.

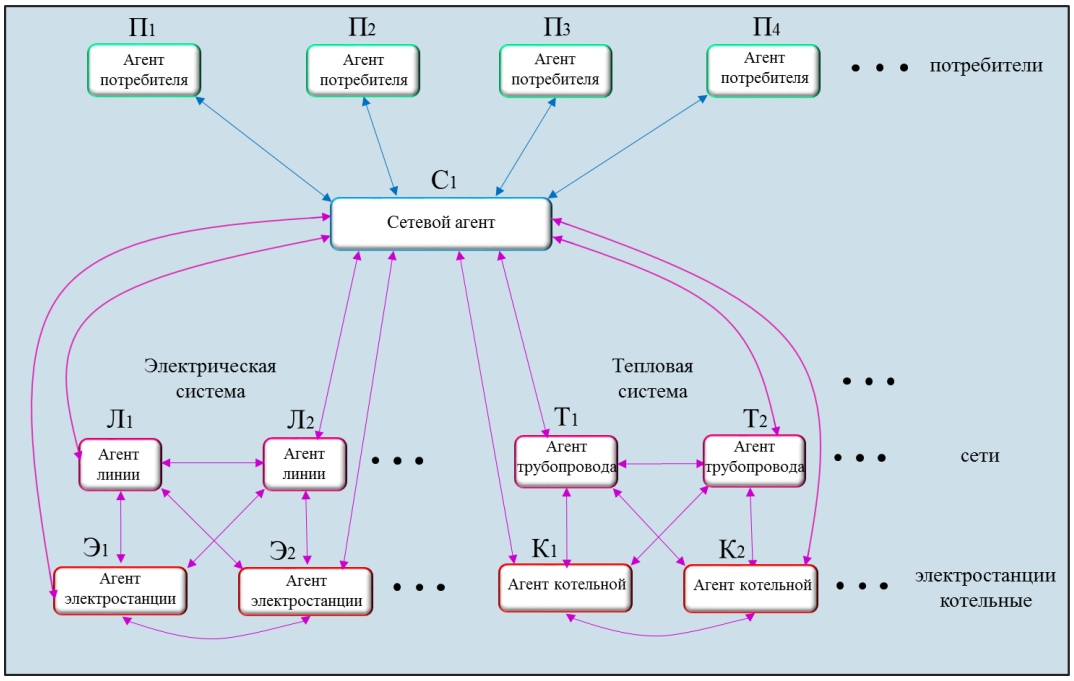


Рис. 3. Структура и взаимодействие агентов в интегрированной энергетической системе

Таблица 1

Агенты, их цели и задачи

Агенты	Цели и задачи	Ограничения
1. Агент-потребителя	Обеспечивает бесперебойную работу оборудования потребителя. Формирует необходимый график нагрузок и отправляет заявки сетевому агенту.	Инфраструктурные ограничения, требования правил безопасности
2. Сетевой агент	Получает заявки на необходимое количество энергии с заданными параметрами от агентов потребителей и распределяет их между агентами источников энергии и сетей, принимает участие при формировании решений задач по снабжению потребителей, при необходимости может создать запрос и перераспределить энергию как в нормальных так и в аварийных ситуациях	Возможности информационных каналов связи, наличие каналов связи с другими агентами, ограничения и нормативные параметры всей ИЭС, требования правил безопасности
3. Агент-источника	Получает заявки на энергию от сетевого агента, оценивает возможность выполнения данной	Возможности информационных каналов

	заявки, осуществляет обмен данными с другими агентами, обеспечивает выработку необходимого количества энергии, нужных параметров на имеющимся генерирующем оборудовании	связи, наличие каналов связи с другими агентами, возможности генерирующего оборудования, требования правил безопасности
4. Агент-сетей	Получает заявки на энергию от сетевого агента, оценивает возможность выполнения данной заявки, осуществляет обмен данными с другими агентами, обеспечивает доставку необходимого количества энергии потребителю, нужных параметров.	Возможности информационных каналов связи, наличие каналов связи с другими агентами, пропускная способность сетей, требования правил безопасности

Мультиагентная модель интегрированной энергетической системы

На основании вышеизложенной структуры МАС разработана модель ИЭС. Эта модель отражает взаимодействие агентов двух технологических систем (электрической и тепловой). Преднамеренное упрощение объекта исследования сделано для наглядного представления работы модели. Дальнейшее ее развитие связано с включением в нее моделей других энергетических систем (например, холодоснабжения, газоснабжения), а также расширение функциональных возможностей.

На рис. 4 приведена укрупненная схема ИЭС, состоящая из двух потребителей (завод и фабрика), двух электрических станций, одной котельной, четырех ЛЭП и двух тепловых магистралей, также у второго потребителя установлен электрический бойлер. Такая схема позволит исследовать модель поведения агентов и взаимодействие между ними. Согласно разработанной структуре агентов и их взаимодействию между собой в рамках предложенной модели осуществляется поиск решения по оптимальному энергоснабжению потребителей.

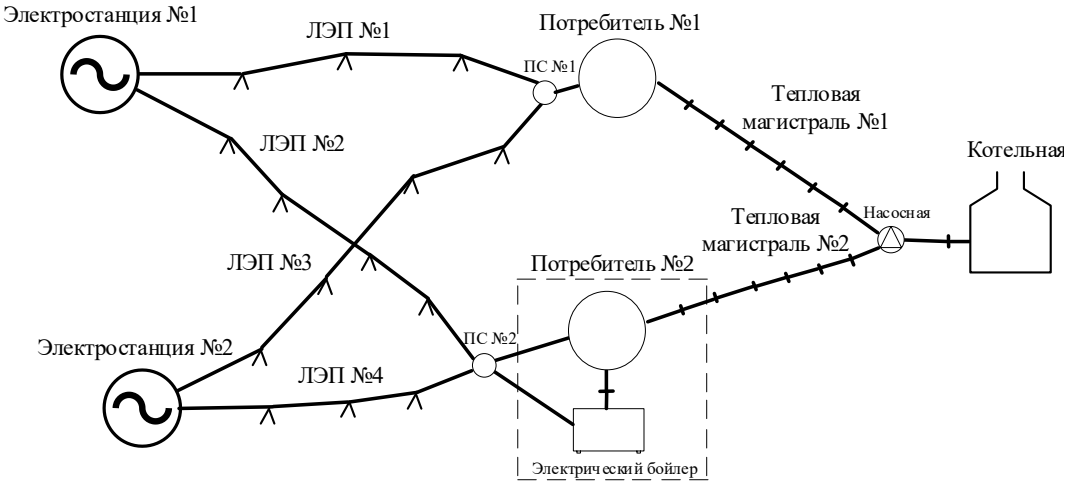
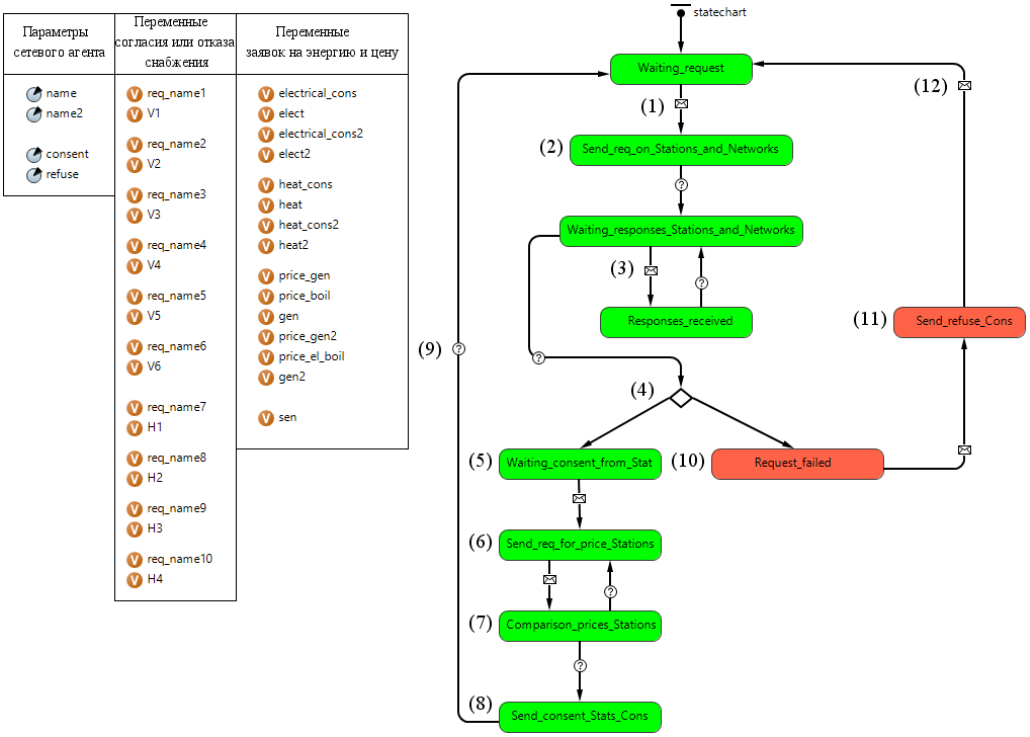


Рис. 4. Схема интегрированной энергетической системы

Описание поведения и взаимодействия агентов в формируемой модели, осуществляется через диаграммы состояний (рис. 5). Диаграмма состояний представляет собой отличительные состояния агента, выполняющего различные действия при происхождении каких-то событий (рис. 5.а), соединенных переходами (рис. 5.б), которые срабатывают в результате получения сообщения, заданного времени, выполнения заданного логического условия и т.д. Срабатывание перехода приводит к смене состояний [14-15].

Диаграмма состояний сетевого агента приведенная на рис. 5.б отражает процесс взаимодействия агентов в системе. После получения заявки от потребителя на энергию (1), сетевой агент отправляет эту заявку соответствующим источникам энергии и сетям (2), которые связаны с данным потребителем и могут передать ему энергию. В свою очередь все потенциальные источники энергии и сети, получив заявку, проверяют необходимые условия и отправляют сетевому агенту ответ о возможности своего участия в снабжении потребителя (при этом причины отказа могут быть различными, загруженность, нахождении в аварии и т.д.). Получив ответы от агентов-источников и агентов-сетей (3), сетевой агент проверяет необходимые ограничения и определяет возможно ли снабжение потребителя или нет (4). Если снабжение потребителя возможно (5), то сетевой агент формирует запрос на стоимость энергии агентам-источников (6), затем сравнивает

полученные цены и выбирает наиболее выгодный вариант (7). После этого он отправляет нужным источникам энергии согласие на снабжение, а остальным отказ и оповещает об этом потребителя, что его заявка на энергию выполнена (8). После отправки сообщений сетевой агент переходит в состояние ожидания заявок (9). Если снабжение потребителя невозможно, то сетевой агент переходит в состояние отклонения заявки (10) и отправляет потребителю отказ (11). После отправки сообщений он переходит в состояние ожидания заявок (12).



а) *б)*

Рис. 5. Диаграмма состояний сетевого агента

Математическая постановка задачи оптимизации энергоснабжения потребителей

Математическая постановка задачи оптимизации энергоснабжения потребителей, заключается в минимизации затрат на энергоснабжения потребителей с учетом выполнения технологических ограничений и условий. Она включает распределение нагрузки между источниками и поиск оптимальных путей снабжения потребителей энергией от этих источников. Заданными являются: временной период $\tau \in [0;\Theta]$; источники электроэнергии *G*; источники тепловой энергии *B*; потребители электроэнергии *K*; потребители тепловой энергии *H*; объем спроса на электроэнергию $P_\tau^Э$, на тепловую энергию Q_τ^T; расстояние $l_g^Э$ от потребителей до источников электроэнергии $g \in G$; тоже для тепловой энергии l_b^T, $b \in B$.

В результате решения поставленной задачи необходимо определить наиболее выгодный для потребителя путь снабжения электроэнергией и тепловой энергией $M = (M_1, ..., M_{g,b})$, состав источников энергии $N = (N_1, ..., N_{g,b})$, которые будут участвовать в снабжении потребителя и объем вырабатываемой тепловой $Q_\tau = (Q_{1,\tau}, ..., Q_{b,\tau})$ и электрической $P_\tau = (P_{1,\tau}, ..., P_{g,\tau})$ энергии.

Требуется минимизировать функцию общих затрат на снабжение потребителей энергией, имеющий вид:

$$Z(M, N, Q_\tau, P_\tau) = \sum_{\tau=0}^{\Theta} \left(\sum_{g=1}^{G} \eta_{g,\tau} C_{g,\tau}^Э + \sum_{b=1}^{B} \rho_{b,\tau} C_{b,\tau}^T \right) \longrightarrow \min,$$

$\eta_{g,\tau} = (\eta_{1,\tau},...,\eta_{G,\tau})$, $\eta_{g,\tau} \in \{0,1\}$, $\rho_{b,\tau} = (\rho_{1,\tau},...,\rho_{B,\tau})$, $\rho_{b,\tau} \in \{0,1\}$,
$M = \left(M_1,...,M_{g,b}\right), M \in R^{g,b}, N = \left(N_1,...,N_{g,b}\right)$, $N \in R^{g,b}$, $Q_\tau = (Q_{1,\tau},...,Q_{b,\tau})$,
$Q_\tau \in R^b$, $P_\tau = (P_{1,\tau},...,P_{g,\tau})$, $P_\tau \in R^g$, $\tau \in [0;\Theta]$,

где $\eta_{g,\tau}$ – состояние *g*-го источника электроэнергии (0 – не задействован, 1 – задействован); $\rho_{b,\tau}$ – состояние *b*-го источника тепла (0 – не задействован, 1 – задействован); $C^{Э}_{g,\tau}$ – суммарные затраты на электроснабжение потребителей от *g*-го источника электроэнергии; $C^{Т}_{b,\tau}$ – суммарные затраты на теплоснабжение потребителей от *b*-го источника тепла;

При решении этой задачи должны выполняться следующие условия и ограничения:

производство тепловой энергии:

$$Q_{\min} \le Q_{b,\tau} \le Q_{\max}, Q \ge 0,\ b \in B;$$

производство электроэнергии:

$$P_{\min} \le P_{g,\tau} \le P_{\max}, P \ge 0,\ g \in G;$$

ограничение пропускной способности пути:

$$L_{\min} \le L_{g,b} \le L_{\max}, L \ge 0, b \in B,\ g \in G;$$

баланс между вырабатываемой и потребляемой энергией:

$$\sum_{g=1}^{G} P_{g,\tau} = \sum_{k=1}^{K} P_\tau^{Э}\ ;\ \sum_{b=1}^{B} Q_{b,\tau} = \sum_{h=1}^{H} Q_\tau^{Т},\ k \in K,\ h \in H;$$

Решение поставленной задачи оптимизации энергоснабжения потребителей выполняется с помощью применения мультиагентного подхода. Практическое его использование рассматривается на примере решения поставленной задачи для поиска оптимального энергоснабжения потребителей ИЭС схема, которой приведена на рис. 4. Приведенный далее анализ вычислительного процесса позволит оценить правильность выполнения своих функций агентами, корректность передачи данных по системе, формирование и работу логических цепочек.

Практическое применение мультиагентного подхода исследования интегрированной энергетической системы

Для простоты понимания алгоритмического процесса выделим два отличающихся исходными условиями варианта вычислительного эксперимента.

Первый вычислительный эксперимент

В первом эксперименте обе электростанции, котельная и электрический бойлер находятся в работоспособном состоянии и могут выработать заданное количество энергии, электрические и тепловые сети также находятся в рабочем состоянии и могут передать необходимое количество энергии.

Исходные данные:

$P_{g1,\tau}$ = 250 МВт – номинальная мощность электростанции №1;

$P_{g2,\tau}$ = 220 МВт – номинальная мощность электростанции №2;

$Q_{b1,\tau}$ = 300 Гкал/ч – номинальная мощность котельной;

$Q_{b2,\tau}$ = 60 Гкал/ч – номинальная мощность электрического бойлера;

$C^{Э}_{g1}$ = 1100 руб./МВт·ч – стоимость на электроэнергию электростанции №1;

$C^{Э}_{g2}$ = 1300 руб./МВт·ч – стоимость на электроэнергию электростанции №2;

C^{T}_{b1} = 1200 руб./Гкал – стоимость на тепловую энергию котельной;

C^{T}_{b2} = 1500 руб./Гкал – стоимость на тепловую энергию электрического бойлера;

$P^{Э}_{1,\tau}$ = 60 МВт – электрическая нагрузка потребителя №1;

$Q_{1,\tau}^{T}$ = 100 Гкал/ч – тепловая нагрузка потребителя №1;

$P_{2,\tau}^{Э}$ = 50 МВт – электрическая нагрузка потребителя №2;

$Q_{2,\tau}^{T}$ = 60 Гкал/ч – тепловая нагрузка потребителя №2;

$P_{3,\tau}^{Э}$ = 70 МВт – нагрузка электрического бойлера;

L_{g1} = 80 МВт – пропускная способность ЛЭП №1;

L_{g2} = 130 МВт – пропускная способность ЛЭП №2;

L_{g3} = 70 МВт – пропускная способность ЛЭП №3;

L_{g4} = 140 МВт – пропускная способность ЛЭП №4;

L_{b1} = 150 Гкал/ч – пропускная способность тепловой магистрали №1;

L_{b2} = 100 Гкал/ч – пропускная способность тепловой магистрали №2.

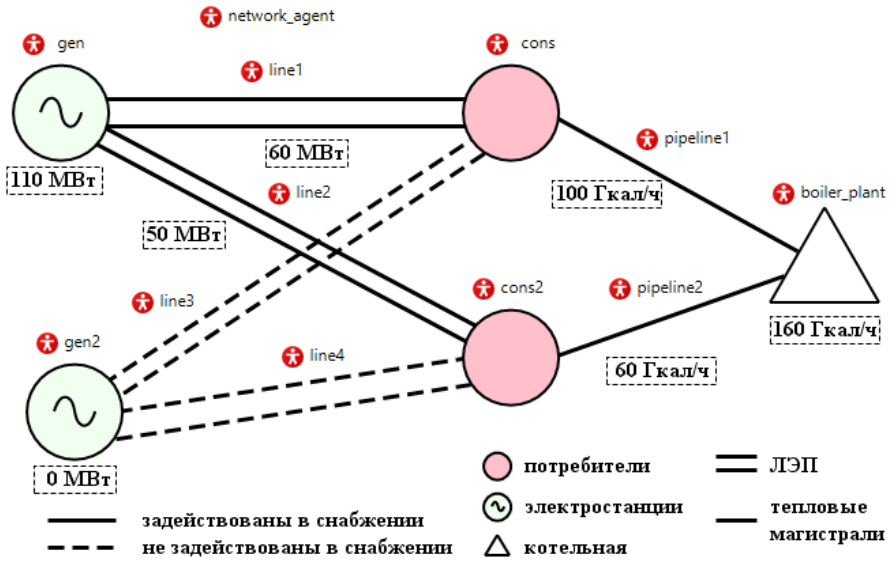


Рис. 6. Схема мультиагентной модели ИЭС для первого эксперимента

В соответствии с заданными условиями формируется вычислительный процесс поиска решения по энергоснабжению потребителей (рис. 6). Агенты-потребителей подготавливают заявки на энергию на сутки вперед, при этом сначала на тепловую энергию. Первый потребитель формирует заявку на 100 Гкал/ч, а второй потребитель на 60 Гкал/ч, затем они отправляют их сетевому агенту, а он в свою очередь перенаправляет данные заявки котельной и электрическому бойлеру, расположенному у второго потребителя, и тепловым сетям. Далее осуществляется поиск решения, путем взаимодействия агентов тепловых сетей и источников тепловой энергии между собой. В результате интегрированная система получает решение, согласно которому снабжение потребителей тепловой энергией будет выполнять котельная, поскольку она обладает необходимом запасом мощности и более низкой стоимостью тепловой энергии по сравнению с электрическим бойлером. Для доставки тепловой энергии будут соответственно задействованы тепловые магистрали № 1 и 2 (рис. 6). После расчета теплоснабжения потребителей, происходит формирование заявок на электроэнергию: первый потребитель формирует заявку на 60 МВт, второй потребитель на 50 МВт. Следует учитывать, что у второго потребителя к исходной нагрузке может прибавиться нагрузка электрического бойлера, но в данном эксперименте это не требуется, поскольку электрический бойлер не участвует в снабжении. Сформированные заявки отправляются сетевому агенту, а он в свою очередь отправляет их агентам двух электростанций и электрических сетей. Как и в случае снабжения тепловой энергией, происходит поиск решения путем взаимодействия агентов электрических сетей и электростанций. В результате интегрированная система получает решение, согласно которому снабжение потребителей будет осуществлять первая электростанция, поскольку она обладает

необходимым запасом мощности и стоимостью электроэнергии более низкой чем у второй электростанции. Для доставки электроэнергии соответственно, будут задействованы ЛЭП № 1 и 2 (рис. 6). Общая стоимость полученного варианта энергоснабжения первого потребителя за сутки составила 4464000 руб., в том числе на электроэнергию 1584000 руб., на тепловую энергию 2880000 руб. Общая стоимость полученного варианта энергоснабжения второго потребителя за сутки составила 3048000, в том числе на электроэнергию 1320000 руб., на тепловую энергию 1728000 руб.

Анализ поведения и взаимодействия агентов показал, что предложенная модель обеспечила получение решения в соответствии с поставленной задачей. Снабжение потребителей электроэнергией предлагается осуществлять от первой электростанции, а снабжение тепловой энергией от котельной. Логическая схема модели и агенты выполнили возложенную на них задачу, их цепочки взаимодействия правильно организовались, передача данных по системе производилась корректно, потребители получили необходимое количество энергии с заданными параметрами.

Второй вычислительный эксперимент

Во втором вычислительном эксперименте первая электростанции не сможет сгенерировать заданное количество электроэнергии (так как она уже загружена), а вторая электростанция обладает необходимой мощностью генерирующего оборудования и возможностью производства электроэнергии для выполнения заявки от потребителей. Помимо этого, количество тепловой энергии производимой котельной хватит для выполнения заявки только от первого потребителя, а снабжение второго потребителя тепловой энергией может осуществиться от электрического бойлера, установленного у данного потребителя. Электрические и тепловые сети находятся в рабочем состоянии и могут передать требуемое количество энергии.

Исходные данные:

$P_{g1,\tau}$ = 0 МВт – номинальная мощность электростанции №1;

$P_{g2,\tau}$ = 220 МВт – номинальная мощность электростанции №2;

$Q_{b1,\tau}$ = 100 Гкал/ч – номинальная мощность котельной;

$Q_{b2,\tau}$ = 60 Гкал/ч – номинальная мощность электрического бойлера;

$C_{g1}^{Э}$ = 1100 руб./МВт·ч – стоимость на электроэнергию электростанции №1;

$C_{g2}^{Э}$ = 1300 руб./МВт·ч – стоимость на электроэнергию электростанции №2;

C_{b1}^{T} = 1200 руб./Гкал – стоимость на тепловую энергию котельной;

C_{b2}^{T} = 1500 руб./Гкал – стоимость на тепловую энергию электрического бойлера;

$P_{1,\tau}^{Э}$ = 60 МВт – электрическая нагрузка потребителя №1;

$Q_{1,\tau}^{T}$ = 100 Гкал/ч – тепловая нагрузка потребителя №1;

$P_{2,\tau}^{Э}$ = 50 МВт – электрическая нагрузка потребителя №2;

$Q_{2,\tau}^{T}$ = 60 Гкал/ч – тепловая нагрузка потребителя №2;

$P_{3,\tau}^{Э}$ = 70 МВт – нагрузка электрического бойлера;

L_{g1} = 80 МВт – пропускная способность ЛЭП №1;

L_{g2} = 130 МВт – пропускная способность ЛЭП №2;

L_{g3} = 70 МВт – пропускная способность ЛЭП №3;

L_{g4} = 140 МВт – пропускная способность ЛЭП №4;

L_{b1} = 150 Гкал/ч – пропускная способность тепловой магистрали №1;

L_{b2} = 100 Гкал/ч – пропускная способность тепловой магистрали №2.

В соответствии с заданными условиями выстраивается схема процесса поиска решения по энергоснабжению потребителей (рис. 7). Как и в первом эксперименте агенты потребителей формируют заявки на энергию на сутки вперед, сначала на тепловую энергию. При этом первый потребитель подготавливает заявку на 100 Гкал/ч, а второй

потребитель на 60 Гкал/ч. Затем они отправляются сетевому агенту, а он в свою очередь перенаправляет эти заявки котельной, электрическому бойлеру второго потребителя и тепловым сетям. Далее осуществляется поиск решения, путем взаимодействия агентов тепловых сетей и источников тепловой энергии между собой. В результате для заданной интегрированной системы было получено решение, согласно которому котельная обеспечивает тепловой энергией только первого потребителя, для чего будет задействована тепловая магистраль №1 (рис. 7). Для снабжения второго потребителя у котельной недостаточно тепловой мощности, поэтому снабжение второго потребителя тепловой энергией будет осуществляться от электрического бойлера. После расчета теплоснабжения потребителей, происходит формирование заявок на электроэнергию. Первый потребитель формирует заявку на 60 МВт, второй потребитель - на 120 МВт, т.е. на 70 МВт больше, поскольку к исходной электрической нагрузке второго потребителя прибавилась нагрузка электрического бойлера, так как в этом решении он участвует в процессе теплоснабжения. Затем сформированные заявки направляются сетевому агенту, а он в свою очередь переправляет их агентам двух электростанций и электрических сетей. Осуществляется поиск решения путем взаимодействия агентов электрических сетей и электростанций. В результате для интегрированной системы формируется решение, согласно которому снабжение потребителей будет осуществлять вторая электростанция, поскольку она обладает необходимой мощностью и более низкой стоимостью электроэнергии. Для доставки электроэнергии соответственно, будут задействованы ЛЭП № 3 и 4 (рис. 7). Первая электростанция загружена и не имеет необходимой мощности для выполнения заявок. Общая стоимость полученного варианта энергоснабжения первого потребителя за сутки составила 4752000 руб., в том числе на электроэнергию 1872000 руб., на тепловую энергию 2880000 руб. Общая стоимость полученного варианта энергоснабжения второго потребителя за сутки составила 3720000, в том числе на электроэнергию 1560000 руб. (без учета затрат на энергоснабжение электрического бойлера, которые включены в стоимость вырабатываемой им тепловой энергии), на тепловую энергию 2160000 руб.

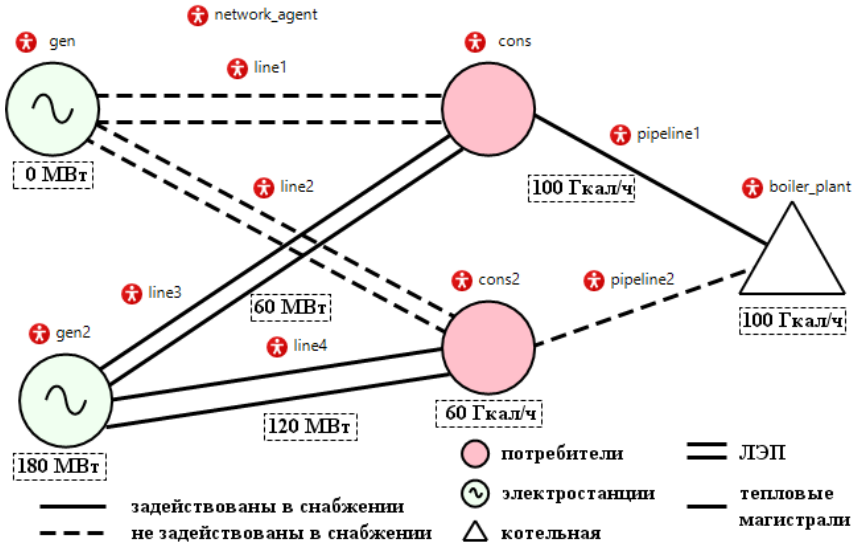


Рис. 7. Схема мультиагентной модели ИЭС для второго эксперимента

В соответствии с решением поставленной задачи снабжение потребителей электроэнергией будет осуществляться от второй электростанции, поскольку она имеет необходимую электрическую мощность и минимальную стоимость электроэнергии. Снабжение первого потребителя тепловой энергией будет производиться от котельной, а снабжение второго потребителя тепловой энергией - от электрического бойлера. Все агенты модели успешно выполнили свои функции, логические цепочки сформировались и отработали правильно, передача данных по системе проводилась корректно, потребители получили необходимое количество энергии, с заданными параметрами в соответствии с принятым критерием оптимальности.

Результаты

Поставленная задача оптимизации энергоснабжения потребителей решена с помощью мультиагентного подхода. Разработанная мультиагентная модель ИЭС обеспечила достижение ожидаемых целевых установок. В процессе исследований были

отработаны механизмы взаимодействия и координации агентов с учетом введенного критерия и ограничений. Проведены два эксперимента с помощью разработанной модели. В результате проведенных экспериментов определены оптимальные варианты снабжения потребителей и проанализирована работоспособность модели с учетом всех условий и ограничений.

Выводы

В настоящей статье рассмотрены тенденции формирования и основные принципы построения ИЭС. Сделана оценка возможности применения мультиагентного подхода к управлению ими. Проведенное исследование показало, что мультиагентный подход представляется актуальным и эффективным методом для моделирования и оптимизации ИЭС. На основании анализа принципов построения ИЭС разработана структура МАС для исследования этих систем, учитывающая ее особенности функционирования и взаимодействия объектов, определены основной состав и типы агентов МАС, их цели и задачи. Разработана мультиагентная модель ИЭС и на ее базе проведены вычислительные эксперименты, показывающие работоспособность предложенной модели.

В дальнейшем данная модель получит развитие в следующих направлениях: учет динамики процессов; включение дополнительных условий и ограничений на параметры режима работы ИЭС; взаимодействие нескольких ИЭС; совместное функционирование активных потребителей и централизованных источников для поддержания баланса в системе.

Теоретическая значимость предложенных разработок заключается в обосновании методов и принципов для моделирования интегрированных энергетических систем на основе мультиагентных технологий.

Практическая значимость исследований определяется разработкой программного прототипа МАС для исследования интегрированных энергетических систем и возможностью моделировать реальные схемы энергоснабжения на базе этого прототипа.

Литература

1. Voropai N.I., Stennikov V.A., Barakhtenko E.A. Methodological principles of constructing the integrated energy supply systems and their technological architecture // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V.1111. No.1.

2. Воропай Н.И., Стенников В.А., Сендеров С.М., и др. Интегрированные инфраструктурные энергетические системы регионального и межрегионального уровня // Энергетическая политика. 2015. № 3. С. 24-32.

3. René Verhoeven, Eric Willems, Virginie Harcouët-Menou, et al. Minewater 2.0 Project in Heerlen the Netherlands: Transformation of a Geothermal Mine Water Pilot Project into a Full Scale Hybrid Sustainable Energy Infrastructure for Heating and Cooling // Energy Procedia. 2014. 46. pp. 58-67.

4. Ran X., Zhou R., Yang Y., et al. The Multi-Objective Optimization Dispatch of Combined Cold Heat and Power Based on the Principle of Equal Emission // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, United States. 22-26 July 2012. pp. 1-5.

5. Amjad Anvari-Moghaddam, Ashkan Rahimi-Kian, Maryam S.Mirian, et al. A multi-agent based energy management solution for integrated buildings and microgrid system // Applied Energy. 2017. V. 203. pp. 41-56.

6. Felix Bünningab, Michael Wettera, Marcus Fuchsb, et al. Bidirectional low temperature district energy systems with agent-based control: Performance comparison and operation optimization // Applied Energy. 2018. V. 209. pp. 502-515.

7. Воропай Н.И., Стенников В.А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Известия Академии наук. Энергетика. 2014. № 1. С. 64-73.

8. Городецкий В.И., Скобелев П.О., Бухвалов О.Л. Промышленные применения многоагентных систем: прогнозы и реалии // Труды 18 Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: ООО «Офорт». 2016. С. 137-162.

9. Yi Ren, Dongming Fan, Qiang Feng, et al. Agent-based restoration approach for reliability with load balancing on smart grids // Applied Energy. 2019. V. 249. pp. 46-57.

10. Negnevitsky M., Tomin N.V., Panasetsky D.A., et al. A neural multi-agent-based approach for preventing blackouts in power systems // 6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, ICAART 2014; 6-8 March 2014; Angers, Loire Valley; France; Code 105589. 2014. pp.565-570.

11. Массель Л.В., Гальперов В.И. Разработка многоагентной системы оценивания состояний электроэнергетических систем с использованием событийных моделей // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Баумана. 2015. №9.

12. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent Agents: Theory and Practice // The Knowledge Engineering Review. 1995. V.10. N2. pp.115-152.

13. Массель Л.В., Гальперов В.И. Разработка многоагентных систем распределенного решения энергетических задач с использованием агентных сценариев // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. № 5. С. 45-53.

14. Абрамов В.И., Кудинов А.Н., Евдокимов Д.С. Применение социального моделирования с использованием агент-ориентированного подхода в приложении к научно-техническому развитию, реализации НИОКР и поддержанию инновационного потенциала // Вестник ВГУИТ. 2019. Т.81. №3. С.339–357.

15. Маковеев В.Н. Применение агент-ориентированных моделей в анализе и прогнозировании социально-экономического развития территорий // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2016. № 5. С. 272-289.

Авторы публикации

Стенников Валерий Алексеевич – чл.-корр. РАН, директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: sva@isem.irk.ru.

Барахтенко Евгений Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: barakhtenko@isem.irk.ru.

Майоров Глеб Сергеевич – аспирант, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: mayorovgs@isem.irk.ru.

References

1. Voropai NI, Stennikov VA, Barakhtenko EA. Methodological principles of constructing the integrated energy supply systems and their technological architecture. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 1111(1). ID: 012001. doi: 10.1088/1742-6596/1111/1/012001.

2. Voropai NI, Stennikov VA, Senderov S.M и др. Integrated infrastructural energy systems regional and interregional level. *Energy Policy*. 2015; 3:24-32.

3. René Verhoeven, Eric Willems, Virginie Harcouët-Menou, et al. Minewater 2.0 Project in Heerlen the Netherlands: Transformation of a Geothermal Mine Water Pilot Project into a Full Scale Hybrid Sustainable Energy Infrastructure for Heating and Cooling. Energy Procedia. 2014; 46:58-67. doi: 10.1016/j.egypro.2014.01.158

4. Ran X, Zhou R, Yang Y, et al. The Multi-Objective Optimization Dispatch of Combined Cold Heat and Power Based on the Principle of Equal Emission. 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, United States. 22-26 July 2012. pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM.2012.6345053

5. Amjad Anvari-Moghaddam, Ashkan Rahimi-Kian, Maryam S.Mirian, et al. A multi-agent based energy management solution for integrated buildings and microgrid system. *Applied Energy*. 2017; 203:41-56. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.007

6. Felix Bünningab, Michael Wettera, Marcus Fuchsb, et al. Bidirectional low temperature district energy systems with agent-based control: Performance comparison and operation optimization. *Applied Energy*. 2018; 209:502-515. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.072

7. Voropai NI, Stennikov VA. Integrated smart energy systems. Izvestiya Akademii nauk. Energetika. 2014; 1:64-73.

8. Gorodetskii VI, Skobelev PO, Bukhvalov OL. Promyshlennye primeneniya mnogoagentnykh sistem: prognozy i realii. *Trudy XVIII Mezhdunarodnoi konferentsii «Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh».* Samara: OOO «Ofort». 2016. pp. 137-162.

9. Yi Ren, Dongming Fan, Qiang Feng, et al. Agent-based restoration approach for reliability with load balancing on smart grids. *Applied Energy*. 2019; 249:46-57. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.04.119

10. Negnevitsky, M., Tomin N.V., Panasetsky D.A., et al. A neural multi-agent-based approach for preventing blackouts in power systems. *6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, ICAART 2014; 6-8 March 2014;* Angers, Loire Valley; France; Code 105589. 2014. pp.565-570.

11. Massel LV, Galperov VI. The development of multi-agent system of state estimation of electric power systems using event models. Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. Baumana. 2015, N.9. doi: 10.7463/ 0915. 0811180.

12. Wooldridge M, Jennings N. Intelligent Agents: Theory and Practice. *The Knowledge Engineering Review*. 1995;10(2):115-152.

13. Massel LV, Galperov VI. Development of multi-agent systems for distributed solutions of energy problems using agent-based scenarios. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2015; 326(5):45-53.

14. Abramov VI, Kudinov AN, Evdokimov DS. Application of social modeling using agent based approach in scientific and technical development, implementation of R&D and maintenance of innovative potential. *Vestnik VGUIT*. 2019; 81(3):339–357. doi:10.20914/2310-1202-2019-3-339-357.

15. Makoveev VN. Using agent-based models in the analysis and forecast of socio-economic development of territories. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. 2016; 5:272-289. doi: 10.15838/esc/2016.5.47.15.

Authors of the publication

Valery A. Stennikov – Melentiev energy systems institute SB RAS, Irkutsk, Russia. E-mail: sva@isem.irk.ru.

Evgeny A. Barakhtenko – Melentiev energy systems institute SB RAS, Irkutsk, Russia. E-mail: barakhtenko@isem.irk.ru.

Gleb S. Mayorov – Melentiev energy systems institute SB RAS, Irkutsk, Russia. E-mail: mayorovgs@isem.irk.ru.

Получено ***27 марта 2020г.***

Отредактировано ***30 июля 2020г.***

Принято ***04 декабря 2020г.***