



Научная статья

УДК 621.311.001.57

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-612-625>

Влияние распределенной генерации энергии на процесс энергоснабжения потребителей в интегрированной энергетической системе

Евгений Алексеевич Барахтенко^{1✉}, Глеб Сергеевич Майоров²^{1,2}Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия¹barakhtenko@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6934-0025>²mayorovgs@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7405-1965>

Резюме. Цель работы – разработка подхода для учета и регулирования доли распределенной генерации в интегрированной энергетической системе. Для моделирования интегрированной энергетической системы используется мультиагентный подход, позволяющий представить такую технологически сложную систему в виде совокупности агентов, которые обладают своим индивидуальным поведением. Суть применения мультиагентного подхода для решения задач исследования состоит в следующем: интегрированная энергетическая система представляется в виде совокупности компонентов, которые моделируются своими агентами с индивидуальным алгоритмом поведения; каждый элемент интегрированной энергетической системы участвует в формировании решения и отстаивает свои интересы, исходя из условий эффективного энергоснабжения. Реализация этого подхода осуществлялась в специализированной программной среде AnyLogic, которая включает в себя базовые компоненты агентного и имитационного моделирования и позволяет создавать любые мультиагентные системы в зависимости от решаемых задач. Разработана оригинальная структура мультиагентной системы для интегрированных энергетических систем, учитывающая особенности ее функционирования и взаимодействия объектов, определены основной состав и типы агентов мультиагентной системы. Выделены следующие типы агентов: агент-потребитель, агент активного потребителя, сетевой агент, агент-менеджер активного потребителя, агент централизованного источника энергии, агент сети, совещательный агент. Разработана мультиагентная модель реальной системы энергоснабжения жилого района г. Иркутск с централизованными и распределенными источниками энергии. Предложены принципы по регулированию доли распределенной генерации в системе, учитывающие эффективный режим работы централизованных источников энергии и позволяющие снизить суммарные затраты на энергоснабжение потребителей путем перераспределения мощности между источниками централизованной и распределенной генерации. Проведенные с использованием разработанной мультиагентной модели исследования интегрированной энергетической системы позволили сформулировать принципы по взаимодействию источников централизованной и распределенной генерации энергии. Благодаря указанным принципам удалось снизить суммарные затраты на 4,22% для теплоснабжения и на 9,94% для электроснабжения потребителей путем перераспределения мощности между этими источниками энергии.

Ключевые слова: интегрированные энергетические системы, мультиагентный подход, централизованная генерация, распределенная генерация, активные потребители

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-38-90266.

Для цитирования: Барахтенко Е. А., Майоров Г. С. Влияние распределенной генерации энергии на процесс энергоснабжения потребителей в интегрированной энергетической системе // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 612–625. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-612-625>.

Impact of distributed energy generation on energy supply to consumers in an integrated energy system

Evgeny A. Barakhtenko^{1✉}, Gleb S. Mayorov²

^{1,2}Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

¹barakhtenko@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6934-0025>

²mayorovgs@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7405-1965>

Abstract. In this work, an approach for accounting and regulating the share of distributed generation in an integrated energy system is developed. In order to model an integrated energy system, a multi-agent approach was used, which presents a technologically complex system as a combination of agents, each having individual behaviour. The essence of a multi-agent approach is as follows: an integrated energy system is represented as a combination of components modelled by their agents having an individual behaviour algorithm; each element of an integrated energy system is involved in the generation of a solution and protects its interests on the basis of efficient energy supply. The implementation of this approach was carried out using the AnyLogic software environment, which includes the basic components of agent and simulation modelling, allowing any multi-agent systems to be developed depending on the application. The custom structure of the multi-agent system for integrated energy systems was developed, factoring in its performance features and interaction of objects, the main composition and types of agents of the multi-agent system being determined. The following types of agents were distinguished: consumer agent, dynamic consumer agent, network agent, manager agent of dynamic consumer, agent of centralised energy source, network agent and advisory agent. A multi-agent model of a real power supply system of a residential area in Irkutsk, having centralised and distributed energy sources, was developed. Taking into account the efficient operation of centralised energy sources, the principles for regulating the share of distributed generation in the system were proposed, allowing the total costs of energy supply to consumers to be reduced by rearranging power between centralised and distributed generation sources. The results obtained using the developed multi-agent model were used to formulate the principles of interactions of centralised and distributed energy generation sources. The redistribution of power between these energy sources on the basis of the above principles reduced the total costs by 4.22% for heat supply and 9.94% for electricity supply to consumers.

Keywords: integrated energy systems, multi-agent approach, centralized generation, distributed generation, active consumers

Funding: The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, project no. 20-38-90266.

For citation: Barakhtenko E. A., Mayorov G. S. Impact of distributed energy generation on energy supply to consumers in an integrated energy system. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):612-625. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-612-625>.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие новых технологий и внедрение инновационного энергетического оборудования оказывает значительное влияние на функционирование энергетических инфраструктур, включающих системы топливо-снабжения, электроснабжения, теплоснабжения, хладоснабжения. Усиливается интеграция энергетических систем, как на технологическом уровне, так и в организационном отношении [1, 2]. Возможность преобразования одного вида энергии в другой в нормальных и аварийных режимах работы энергосистем обеспечивает расширение их функций, повышение надежности и гибкости управления [3].

Создание интегрированных энергетиче-

ских систем (ИЭС) с активными потребителями и распределенными функциями управления, использующих совместно с централизованной генерацией распределенные источники энергии, является перспективной альтернативой существующим традиционным энергосистемам с иерархическим построением [4–6]. Объединение разрозненных систем различного типа в единый технологический комплекс может обеспечить реализацию новых функциональных возможностей, применение более совершенных технологий в эксплуатации и создание интегрированных централизованно-распределенных систем с координированным управлением их режимами и активным участием потребителей в процессе энергоснабжения [7].

Данные, приведенные в этой статье, расширяют текущее состояние в области знаний, связанных с управлением централизованной и распределенной генерациями, предлагая подход для учета и регулирования доли распределенной генерации в ИЭС, включающей объекты, которым энергия может поставляться только от централизованных источников, и объекты, которые имеют возможность выбора между централизованным и распределенным энергоснабжением с учетом зон эффективной работы генерирующего оборудования централизованных источников энергии. В результате задача учета и регулирования доли распределенной генерации в интегрированной энергетической системе является сложной, что связано со следующими положениями:

- существует множество центров принятия решения по снабжению энергией различного вида с возможностью преобразования из одного вида в другой;

- необходимо рассматривать большое количество элементов со сложным поведением.

Для решения этой задачи авторами предложено использовать мультиагентный подход, в котором решение формируется вследствие взаимодействия множества самостоятельных целенаправленно действующих агентов [8, 9].

С использованием разработанного подхода выполнены исследования реальной схемы энергоснабжения одного из городских районов г. Иркутск, представленной в виде ИЭС, состоящей из систем электро- и тепло-снабжения, и включающей обычных и активных потребителей с собственными источниками энергии. Проведенный комплекс исследований показал работоспособность и эффективность предложенных принципов регулирования, с помощью которых удалось снизить суммарные затраты на энергоснабжение потребителей путем перераспределения мощности между источниками централизованной и распределенной генераций.

СТРУКТУРА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

Мультиагентный подход, как уже было отмечено выше, представляет интерес для

моделирования и исследования взаимодействия централизованной и распределенной генераций энергии. Он позволяет адекватно и детально исследовать механизмы взаимодействия и координации элементов в интегрированной энергетической системе [10–12]. В основе мультиагентного подхода лежит понятие мобильного программного агента, который реализован и функционирует как самостоятельная специализированная компьютерная программа или как элемент искусственного интеллекта. В классических методах поиск наилучшего решения задачи осуществляется с помощью четко определенного алгоритма, все ресурсы заданы и не меняются в ходе ее решения, а размерность задачи ограничена во избежание замедления процесса решения. Мультиагентные технологии направлены на получение решения в результате взаимодействия множества самостоятельных целенаправленно действующих агентов, и в этом случае применяется распределенный подход к решению задачи, когда сложная задача разбивается на множество задач меньшей размерности, а затем путем самоорганизации определяется согласованное решение. При этом за счет множества взаимодействий между агентами в модели может быть получено решение для задачи практически любой размерности [13–15].

Укрупненная структура мультиагентной системы, разработанная для исследования взаимодействия централизованной и распределенной генераций в ИЭС, представлена на рис. 1. Каждый объект имеет своего агента, отражающего его поведение в системе, связи с другими агентами, характеристики, параметры и индивидуальные ограничения. Подробно взаимодействие агентов в мультиагентной системе показано на блок-схеме, представленной на рис. 2. Агенты потребителей и агенты активных потребителей формируют заявки на необходимое количество энергии и отправляют их, соответственно, сетевому агенту и агенту-менеджеру активных потребителей. Кроме того, они отправляют информацию по заявкам на энергию совещательному агенту (1). В свою очередь сетевой агент отправляет эти заявки

сначала агентам сетей (2), которые, получив их, производят проверку и отправляют ответ сетевому агенту о возможности участия в энергоснабжении (3). Затем сетевой агент отправляет заявки агентам централизованных источников энергии (4), которые при получении данных заявок производят опрос готовности участия сетей в энергоснабжении (5). После получения ответов от агентов сетей (6) осуществляется проверка, и отправляется ответ сетевому агенту о возможности участия в энергоснабжении (7). Получив данные от сетей и централизованных источников энергии, сетевой агент осуществляет проверку возможности энергоснабжения потребителей. Если энергоснабжение возможно, то производится расчет доли централизованных источников в системе, и на основании результатов расчета формируются ограничения на минимальное количество энергии, которую активные потребители должны взять

от централизованных источников, чтобы система находилась в эффективном режиме работы.

Затем сформированные ограничения на энергию и ограничения на пропускную способность сетей отправляются агенту-менеджеру активных потребителей (8), который в свою очередь после получения данных отправляет запрос о готовности к источникам распределенной генерации у активных потребителей (9). Получив ответ от распределенной генерации (10), агент-менеджер производит проверку возможности энергоснабжения активных потребителей. Если энергоснабжение возможно, то выполняется поиск оптимального решения по энергоснабжению активных потребителей на основе решения задачи смешанного целочисленного линейного программирования. После произведенного расчета отправляется уведомление о полученном решении сетевому агенту (11).

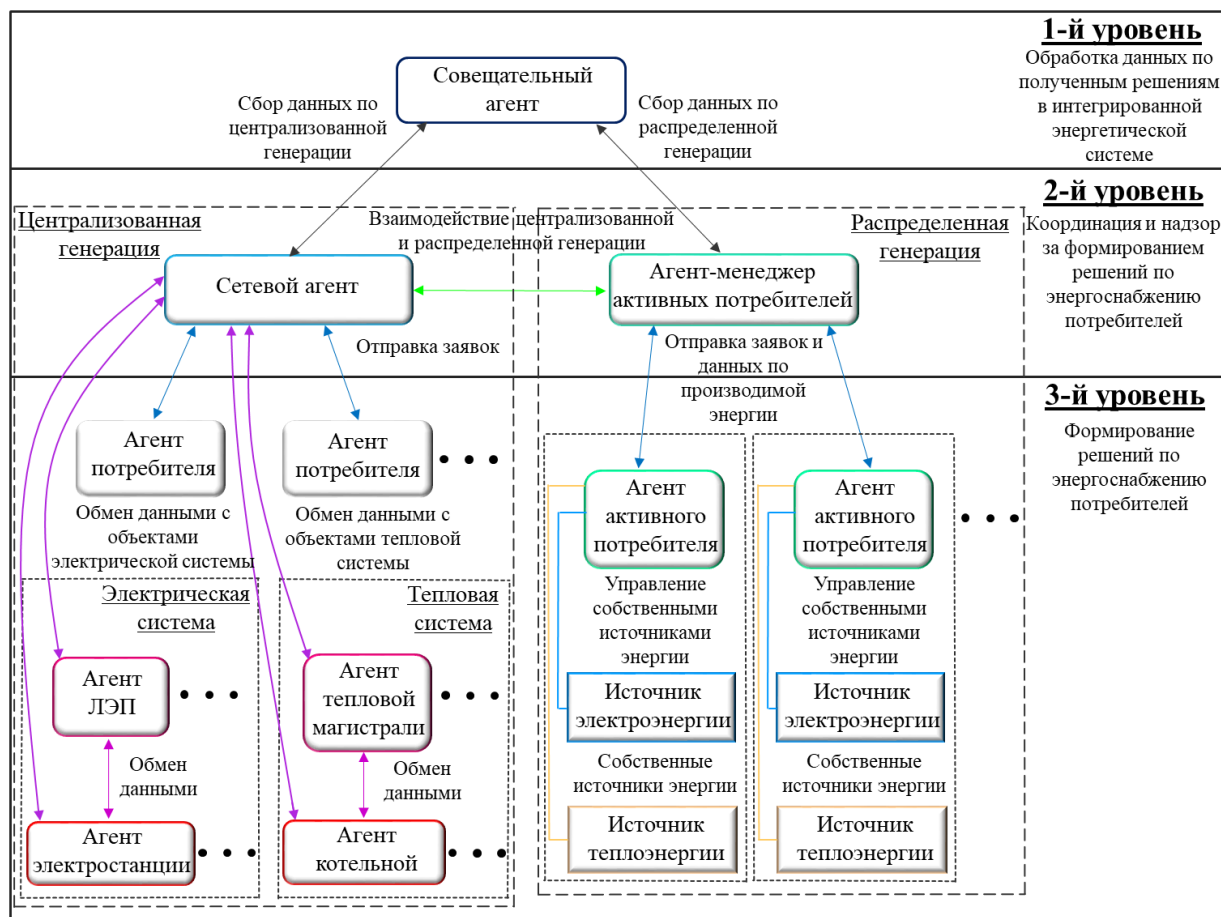


Рис. 1. Структура мультиагентной системы
Fig. 1. Structure of a multi-agent system

Сетевой агент также производит поиск решения по оптимальному энергоснабжению потребителей с использованием решателя смешанного целочисленного линейного программирования. Затем отправляется уведомление о полученном решении агенту-менеджеру активных потребителей (12). Агент-менеджер, получив уведомление, сначала отправляет данные о задействованной мощности распределенной генерации к активным потребителям (13), после этого отправляет данные с подробным расчетом сетевому агенту (14). Получив данные о расчете энергоснабжения активных потребителей, сетевой агент производит расчет затрат на энергоснабжение потребителей в зависимости от того, в какой зоне эффективности находятся централизованные источники энергии (деление осуществляется на четыре зоны, в зависимости от производимой мощности и окупаемости системы). Информация о затратах на энергоснабжение потребителей отправляется совещательному агенту (15). Равным образом данные по расчету энергоснабжения отправляются потребителям (16), у которых производится проверка правильности выполнения заявок.

Затем сетевой агент отправляет данные по задействованной мощности агентам централизованных источников (17) и, получив уведомление об успешной загрузке генерирующего и сетевого оборудования (18), информирует об этом агента-менеджера активных потребителей (19). В свою очередь агент-менеджер, имея все необходимые данные, производит расчет затрат на энергоснабжение активных потребителей и отправляет полученные результаты совещательному агенту (20) и агентам активных потребителей (21). Получив данные по затратам на энергоснабжение, агенты активных потребителей отправляют информацию совещательному агенту о задействованной мощности источников распределенной генерации в процессе энергоснабжения (22). Сетевой агент также информирует потребителей о полученных затратах на энергоснабжение (23). После этого агенты централизованных источников энергии рассылают данные по загрузке сетевого оборудования агентам се-

тей, связанных с ними (24), и совещательному агенту (26). Исходя из полученной информации, агенты-сетей производят расчет суммарных потерь энергии в элементах сети и полученные результаты отправляют совещательному агенту (25). В конце алгоритма совещательный агент обрабатывает данные полученных решений и выводит результаты в виде графиков и диаграмм.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ В ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Математическая постановка задачи оптимизации энергоснабжения потребителей заключается в минимизации затрат на энергоснабжение 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 электрическая и тепловая сеть, состоящие из множества участков: $J \supset J_e \cup J_h$, где $J_e \supset J_{ce} \cup J_{de}$ – это участки электрической сети, включающие кабельные линии, задействованные в централизованной J_{ce} и распределенной J_{de} сети, а $J_h \supset J_{ch} \cup J_{dh}$ – это участки тепловой сети, включающие тепловые магистрали, задействованные в централизованной J_{ch} и распределенной J_{dh} сети; временной период $\tau \in [0; \theta]$; источники энергии $I \supset I_{ce} \cup I_{de} \cup I_{ch} \cup I_{dh}$, включающие централизованные I_{ce} и распределенные I_{de} источники электроэнергии, и централизованные I_{ch} и распределенные I_{dh} источники тепловой энергии; потребители энергии $K \supset K_e \cup K_h$, включающие потребителей электрической K_e и тепловой K_h энергии, для каждого из которых задан объем спроса на энергию $P_c^{i,\tau}$.

Требуется минимизировать функцию суммарных затрат на энергоснабжение в интегрированной энергетической системе, имеющей следующий вид:

$$C_t = C_g + C_n, \quad (1)$$

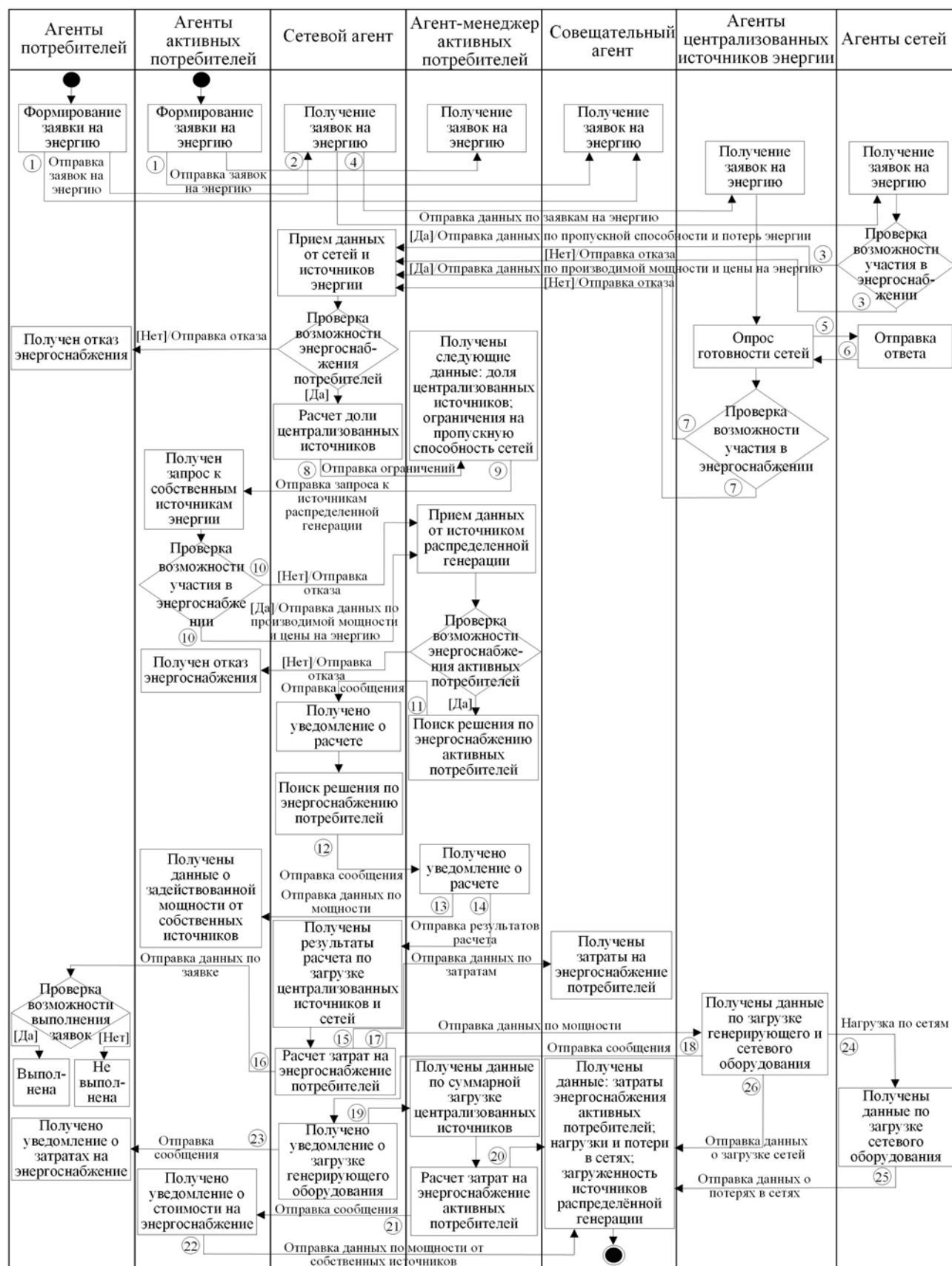


Рис. 2. Взаимодействие агентов при формировании решения
Fig. 2. Agent interaction when forming a solution

где C_g – суммарные затраты на выработку электрической и тепловой энергий; C_n – суммарные затраты на передачу электрической и тепловой энергий.

Суммарные затраты на выработку энер-

гии состоят из затрат на выработку электроэнергии на централизованных и распределенных источниках электроэнергии и из затрат на выработку тепловой энергии на централизованных и распределенных источниках тепловой энергии:

$$C_g = \sum_{\tau=0}^{\theta} \left[\left(\sum_{i \in I_{ce}} (1 + \rho(P^{i,\tau})) \cdot C_{ce} \cdot P^{i,\tau} + \sum_{i \in I_{de}} C_{de}^i \cdot P^{i,\tau} \right) + \left(\sum_{i \in I_{ch}} (1 + \rho(P^{i,\tau})) \cdot C_{ch} \cdot P^{i,\tau} + \sum_{i \in I_{dh}} C_{dh}^i \cdot P^{i,\tau} \right) \right], \quad (2)$$

где C_{ce} – затраты на выработку электроэнергии на централизованных источниках; C_{de}^i – затраты на выработку электроэнергии на распределенных источниках; C_{ch} – затраты на выработку тепловой энергии на централизованных источниках; C_{dh}^i – затраты на выработку тепловой энергии на распределенных источниках; $P^{i,\tau}$ – объем вырабатываемой, соответственно, тепловой и электрической энергий; ρ – коэффициент эффективности работы централизованных источников, который добавляет дополнительную стоимость на энергию от централизованных источников, если система ушла в неэффективный режим работы (0 – I зона «эффективный режим»; 0,1 – II зона «неэффективный режим»; 0,2 – III зона «неэффективный режим»; 0,35 – IV зона «неэффективный режим»).

Суммарные затраты на передачу энергии по сетям состоят из затрат на потери электроэнергии в кабельных линиях, постоянных эксплуатационных затрат в электрической сети, затрат энергии при перекачке теплоносителя, а также из затрат на потери тепловой энергии в тепловых магистралях и постоянных эксплуатационных затрат тепловых сетей:

$$C_n = \sum_{\tau=0}^{\theta} \left[\left(\sum_{j \in J_e} (C_{je} \cdot \Delta P_e^{j,\tau}) + C_{oe} \right) + \left(\sum_{j \in J_h} (C_{ce} \cdot P_p^{j,\tau} + C_{eh} \cdot \Delta P_h^{j,\tau}) + C_{oh} \right) \right], \quad (3)$$

где C_{je} – удельные затраты на потери электрической энергии в кабельных линиях; C_{eh} – удельные затраты на потери тепловой энергии в тепловых магистралях; C_{oe} – постоянные эксплуатационные затраты в электрической сети; C_{oh} – постоянные эксплуатационные затраты в тепловой сети; $\Delta P_e^{j,\tau}$ – потери электроэнергии в

кабельных линиях; $P_p^{j,\tau}$ – затраты энергии при перекачке теплоносителя; $\Delta P_h^{j,\tau}$ – потери тепловой энергии в тепловых магистралях.

При решении этой задачи должны выполняться следующие условия и ограничения:

– двусторонние ограничения на производство тепловой и электрической энергий:

$$\underline{P}^i \leq P^{i,\tau} \leq \overline{P}^i, \quad i \in I; \quad (4)$$

– ограничение пропускной способности кабельных линий и тепловых магистралей:

$$\underline{x}^j \leq x^{j,\tau} \leq \overline{x}^j, \quad j \in J; \quad (5)$$

– условие баланса вырабатываемой и потребляемой энергий:

$$\sum_{i \in I_{ce}} P^{i,\tau} + \sum_{i \in I_{de}} P^{i,\tau} = \sum_{i \in K_e} P_c^{i,\tau} + \sum_{j \in J_e} \Delta P_e^{j,\tau} + \sum_{j \in J_h} P_p^{j,\tau}; \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I_{ch}} P^{i,\tau} + \sum_{i \in I_{dh}} P^{i,\tau} = \sum_{i \in K_h} P_c^{i,\tau} + \sum_{j \in J_h} \Delta P_h^{j,\tau}. \quad (7)$$

Решение поставленной задачи оптимизации энергоснабжения потребителей выполняется с помощью применения мультиагентного подхода. Для нахождения оптимального распределения нагрузки между источниками распределенной генерации активного потребителя используется смешанное целочисленное линейное программирование [16, 17].

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ МОДЕЛИ

На рис. 3 приведена схема ИЭС, включающая в себя 15 потребителей, 8 из них являются активными потребителями (имеют собственные источники тепловой и электрической энергии); 16 кабельных линий; 33 тепловые магистрали; по одному источнику централизованной электрической и тепловой энергии, каждый из которых имеет 4 зоны эффективной работы генерирующего оборудования. Представленная схема разработана на основе реальной схемы энергоснабжения одного из городских районов г. Иркутск, включающая обычных и активных потребителей с собственными источниками энергии. Эта схема позволяет наглядно представить поведение агентов и взаимодействие между ними при решении поставленных задач.

Для реализации мультиагентной модели ИЭС используется программная среда AnyLogic, которая включает в себя базовые компоненты агентного моделирования, концепции и средства из классических областей имитационного моделирования [18–19]. Согласно разработанной структуре мультиагентной ИЭС, создана ее модель в программной среде AnyLogic. Для реализации мультиагентной модели используется данная программная среда как наиболее подходящий инструмент, позволяющий моделировать ИЭС с множеством взаимодействующих элементов со сложным поведением. Благодаря предложенному подходу и разработанным авторами программных компонентов, значительно упрощается построение сложных моделей, например, для управления такими системами, как ИЭС.

Описание логики и поведения агентов в разработанной мультиагентной модели осуществляется через диаграммы состояний. Диаграммы состояний содержат информацию о различных состояниях, в которых может существовать объект, и о том, как он переходит из одного состояния в другое. Переходы из одного состояния в другое могут сработать в результате заданного в качестве условия появления события: истечение заданного времени, получение сообщения, выполнение заданного логического условия и

т.д. Главное назначение диаграмм состояний – описать возможные последовательности состояний и переходов, которые в совокупности характеризуют поведение моделируемой системы в течение всего ее жизненного цикла.

ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ

Исследования выполнялись для представленной выше реальной системы электро-, теплоснабжения (рис. 3). Пример расчета этой схемы энергоснабжения представлен на рис. 4. Анализ данных показывает, что активные потребители весь свой спрос на энергию обеспечили от собственных источников. Это объясняется тем, что сложившаяся стоимость энергоснабжения от распределенных источников генерации энергии оказалась ниже, чем от централизованных источников энергии. Это привело к тому, что энергосистема была вынуждена работать в неэффективном режиме с повышенными экономическими затратами на генерацию энергии централизованными источниками. В результате потребители, не имеющие собственных источников энергии, получили энергию от централизованных источников с более высоким уровнем тарифа. Повышение тарифа происходит за счет увеличения эксплуатационных затрат и затрат на техническое обслуживание генерирующего оборудования. В рамках данного исследования была определена нижняя граница потребляемой мощности централизованных источников, обеспечивающая окупаемость системы. В соответствии с установленным тарифом, для электрической системы она определена на уровне 200 МВт, а для тепловой системы – 838 ГДж/ч, который формируется исходя из четырех зон эффективной работы централизованного генерирующего оборудования.

С помощью разработанного подхода были проведены многовариантные расчеты со смещением доли централизованной и распределенной генераций в энергосистеме путем перераспределения нагрузки между обычными и активными потребителями. Их результаты приведены на рис. 5 и 6. Они от-

ражают зависимости суммарных затрат на энергоснабжение потребителей в электро- и теплоэнергетических системах от доли энергии, получаемой из централизованной системы. На графике можно увидеть, что, переходя из одной зоны эффективности в другую, суммарные затраты на энергоснабжение потребителей уменьшаются за счет снижения стоимости энергии, производимой централизованными источниками. Но с увеличением доли централизованной энергии в рамках одной зоны стоимость энергоснабжения растет за счет того, что нагрузка распределенной генерации уменьшается, а она для заданных условий является менее дорогостоящей.

Распределенная генерация, использующая возобновляемые источники энергии, в

соответствии с заданными исходными данными является более экономичной по сравнению с традиционными централизованными источниками энергии. Однако заменить полностью централизованную генерацию энергии нет возможности, что обусловлено недостаточной развитостью технологического оснащения и отсутствия возможности установки распределенного генерирующего оборудования, необходимой мощности у потребителей вследствие технических и технологических факторов [20–22]. Поэтому возникает необходимость комбинирования централизованных и распределенных источников энергии при соблюдении баланса мощности, что и было показано в данном исследовании.

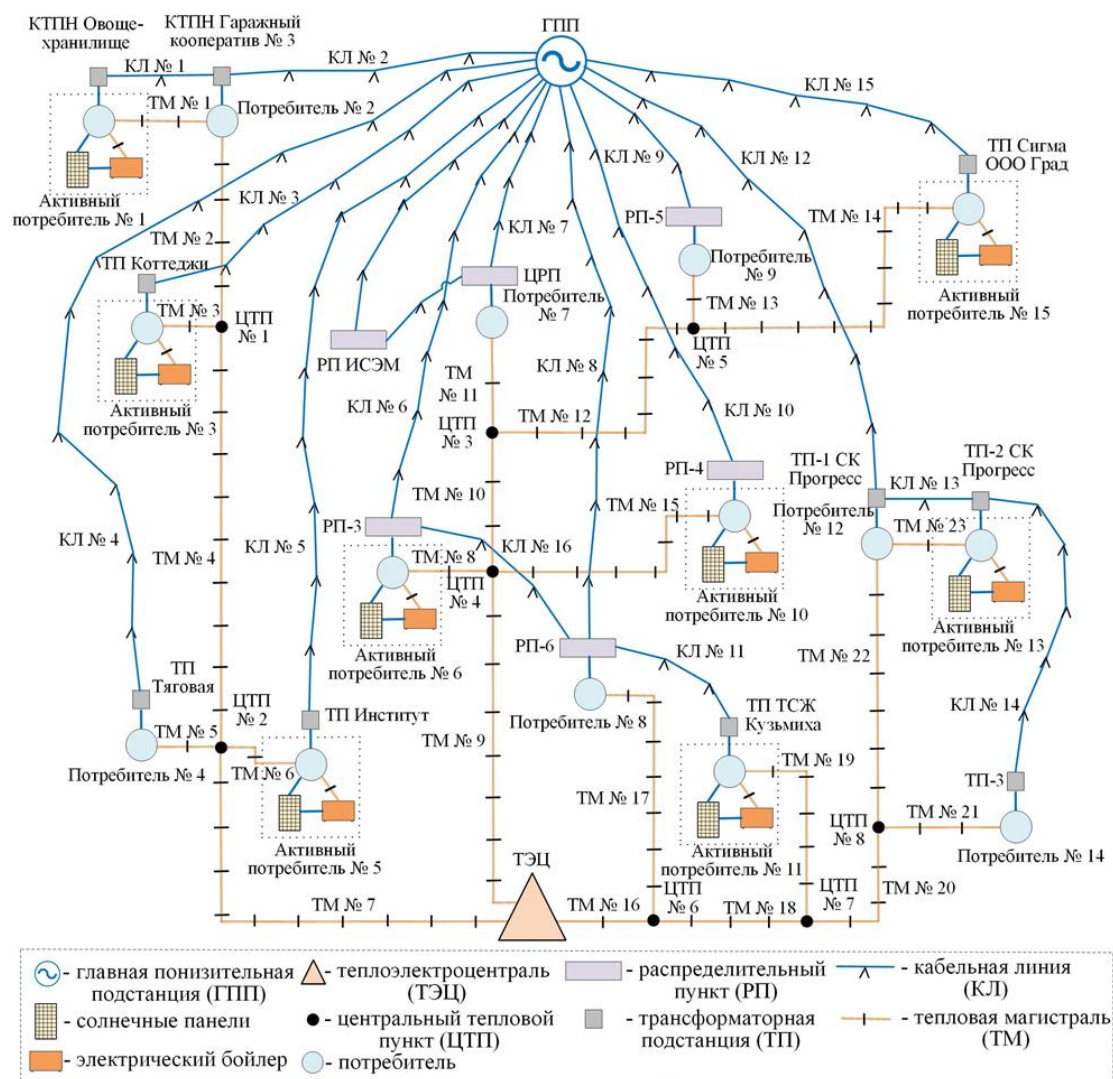


Рис. 3. Схема интегрированной энергетической системы
Fig. 3. Diagram of the integrated energy system

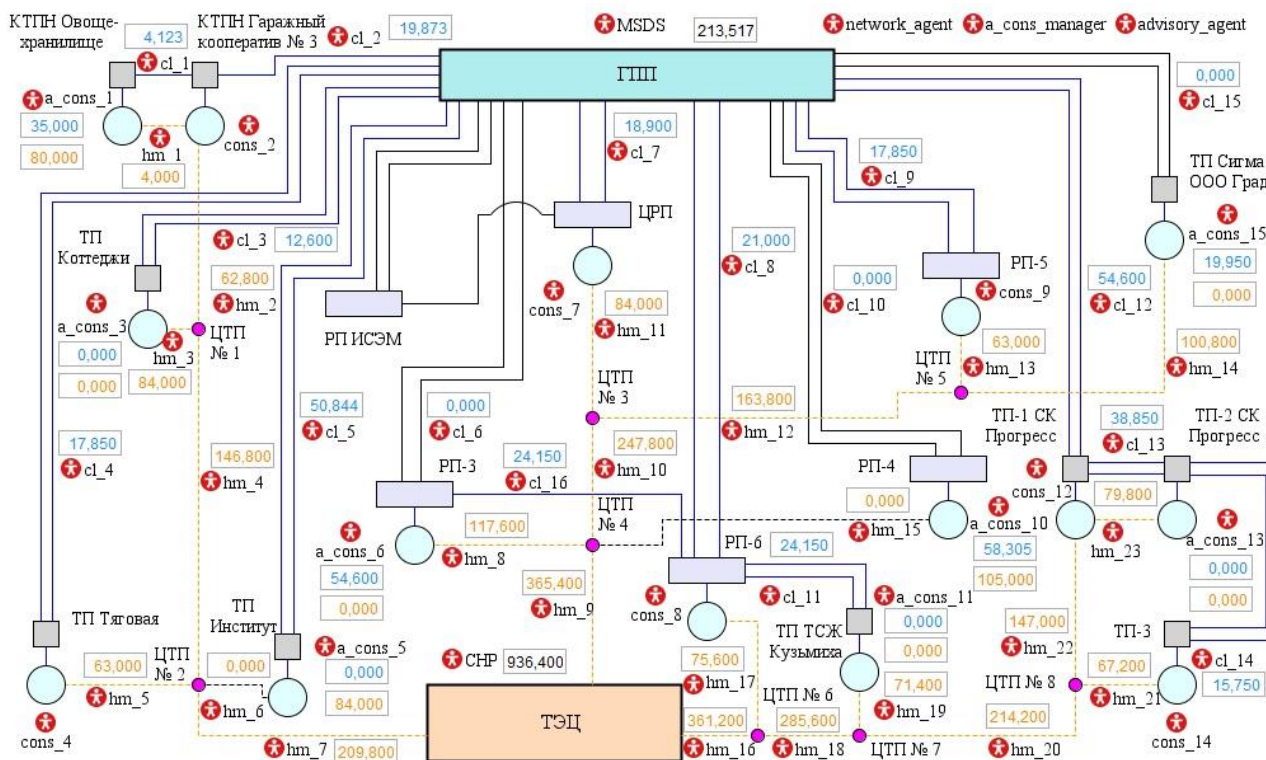


Рис. 4. Результаты расчета энергоснабжения потребителей
Fig. 4. Calculation results of consumer energy supply

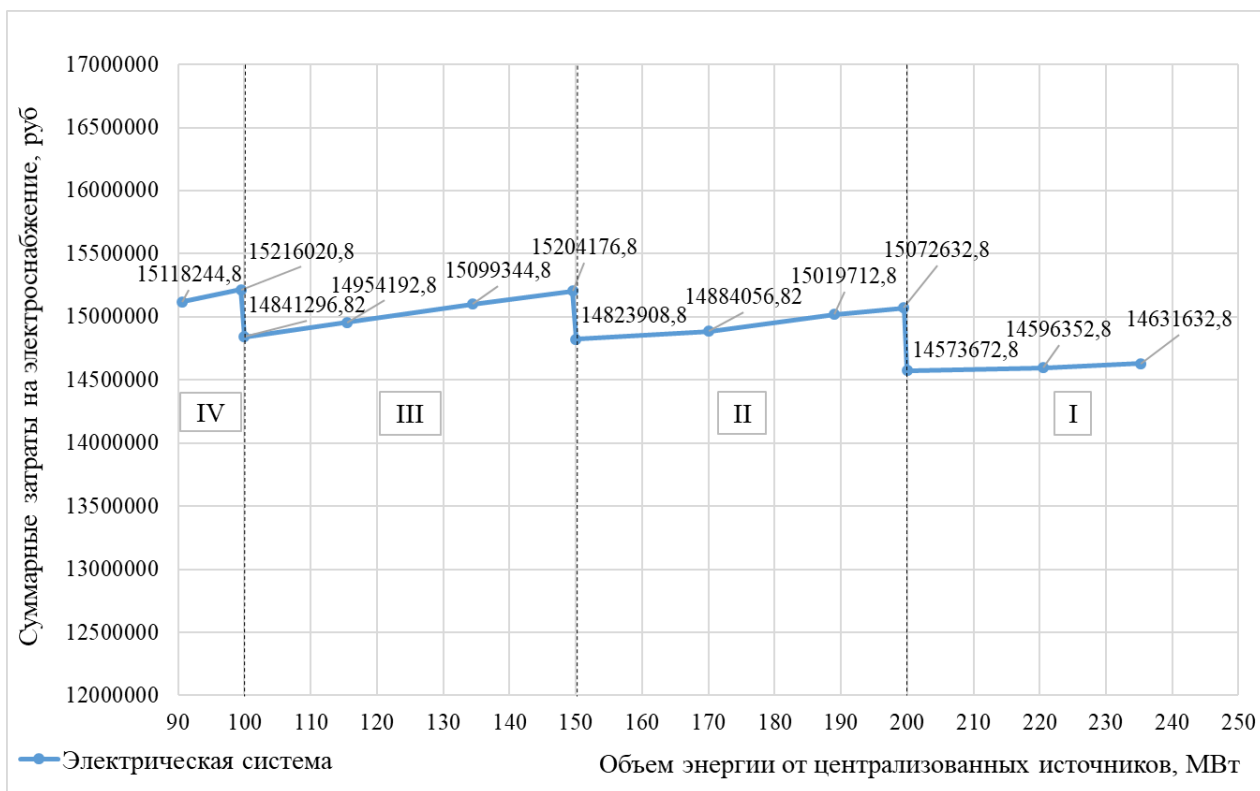


Рис. 5. Зависимость суммарных затрат на электроснабжение потребителей от доли централизованной генерации в энергосистеме
Fig. 5. Dependence of the total cost of consumer power supply on the share of centralized generation in the energy system

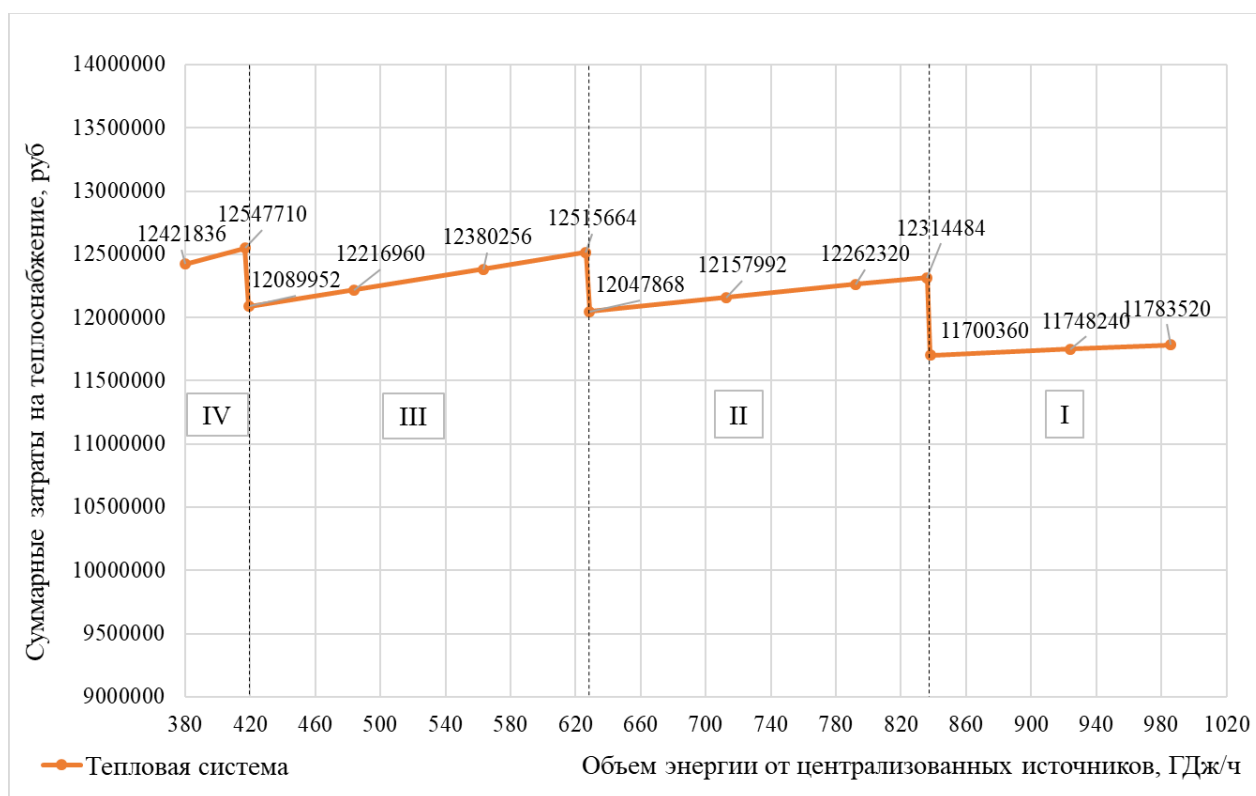


Рис. 6. Зависимость суммарных затрат на теплоснабжение потребителей от доли централизованной генерации в энергосистеме

Fig. 6. Dependence of the total costs for consumer heat supply on the share of centralized generation in the energy system

Результаты, полученные для экспериментов, соответствуют ситуации, происходящей в энергоснабжении рассматриваемого городского района. Применение предложенного подхода позволяет снизить суммарные затраты на энергоснабжение, при этом выполняются все технические и технологические ограничения в системе электро-, теплоснабжения этого городского района.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработана мультиагентная структура для взаимодействия энергетических объектов централизованной и распределенной генераций. Сформирована мультиагентная модель ИЭС, которая осуществляет учет и регулирование доли распределенной генерации энергии в процессе энергоснабжения потребителей в ИЭС. В соответствии с предложенной структурой мультиагентной системы определены основной состав и типы агентов,

а также разработаны алгоритмы работы каждого типа агента, сформированы диаграммы состояний, отражающие особенности поведения агентов и взаимодействия их между собой. В рамках предложенного подхода выполнена математическая постановка задачи оптимизации энергоснабжения в ИЭС с учетом распределенной генерации энергии.

С помощью мультиагентной модели интегрированной энергетической системы, основанной на реальной схеме энергоснабжения одного из городских районов г. Иркутск, включающая обычных и активных потребителей с собственными источниками энергии, выполнен комплекс исследований, показывающих работоспособность и эффективность предложенных принципов регулирования, с помощью которых удалось снизить суммарные затраты на энергоснабжение потребителей путем перераспределения мощности между источниками централизованной и распределенной генераций.

Список источников

1. Wang Minli, Zhang Tao, Wang Peihong, Chen Xiaolong. An improved harmony search algorithm for solving day-ahead dispatch optimization problems of integrated energy systems considering time-series constraints // *Energy & Buildings*. 2020. Vol. 229. P. 110477. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110477>.
2. Asl D. K., Seifi A. R., Rastegar M., Mohammadi M. Optimal energy flow in integrated energy distribution systems considering unbalanced operation of power distribution systems // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 121. P. 106132. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106132>.
3. Стенников В. А., Воропай Н. И., Барахтенко Е. А., Соколов Д. В. Цифровизация интегрированных энергетических систем // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2020. № 4. С. 5–10. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-4-5-10>.
4. Воропай Н. И., Стенников В. А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // *Известия Российской Академии наук. Энергетика*. 2014. № 1. С. 64–73.
5. Chen Houhe, Zhang Yutong, Zhang Rufeng, Lin Chuqiao, Jiang Tao, Li Xue. Privacy-preserving distributed optimal scheduling of regional integrated energy system considering different heating modes of buildings // *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 237. P. 114096. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114096>.
6. Liu Wen Hui, Ho Wai Shin, Lee Ming Yang, Hashim H., Lim Jeng Shiun, Klemes J.J., et al. Development and optimization of an integrated energy network with centralized and decentralized energy systems using mathematical modelling approach // *Energy*. 2019. Vol. 183. P. 617–629. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.158>.
7. 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. Vol. 1111. No. 1. P. 012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1111/1/012001>.
8. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent agents: theory and practice // *The knowledge engineering review*. 1995. Vol. 10. Iss. 2. P. 115–152. <https://doi.org/10.1017/S0269888900008122>.
9. Fisher K., Müller J. P., Heimig I., Scheer A.-W. Intelligent agents in virtual enterprises // *The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology: Proceedings of the First International Conference*. London, UK. 1996. P. 205–224.
10. Gomes L., Vale Z., Corchado J. M. Microgrid management system based on a multi-agent approach: an office building pilot // *Measurement*. 2020. Vol. 154. P. 107427. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107427>.
11. Anvari-Moghaddam A., Rahimi-Kian A., Mirian M. S., Guerrero J. M. A multi-agent based energy management solution for integrated buildings and microgrid system // *Applied Energy*. 2017. Vol. 203. P. 41–56. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.007>.
12. Wang Lingfeng, Wang Zhu, Yang Rui. Intelligent multi-agent control system for energy and comfort management in smart and sustainable buildings // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012. Vol. 3. Iss. 2. P. 605–617. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2178044>.
13. Ren Yi, Fan Dongming, Feng Qiang, Wang Zili, Sun Bo, Yang Dezhen. Agent-based restoration approach for reliability with load balancing on smart grids // *Applied Energy*. 2019. Vol. 249. P. 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.119>.
14. Khan M. W., Wang Jie, Xiong Linyun, Ma Meiling. Modelling and optimal management of distributed microgrid using multiagent systems // *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 41. P. 154–169. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.018>.
15. Kou Yu, Bie Zhaohong, Li Gengfeng, Liu Fan, Jiang Jiangfeng. Reliability evaluation of multi-agent integrated energy systems with fully distributed communication // *Energy*. 2021. Vol. 224. P. 120123. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120123>.
16. Najafi F., Fripp M. Stochastic optimization of comfort-centered model of electrical water heater using mixed integer linear programming // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020. Vol. 42. P. 100834. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100834>.
17. Moazeni F., Khazaei J. Optimal operation of water-energy microgrids; a mixed integer linear programming formulation // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 275. P. 122776. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122776>.
18. Muravev D., Hu Hao, Rakhmangulov A., Mishkurov P. Multi-agent optimization of the intermodal terminal main parameters by using AnyLogic simulation platform: case study on the Ningbo-Zhoushan port // *International Journal of Information Management*. 2021. Vol. 57. P. 102133. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102133>.
19. Мокшин В. В., Кирпичников А. П., Маряшина Д. Н., Стадник Н. А., Золотухин А. В. Сравнение систем структурного и имитационного моделирования Stratum 2000, Actor Pilgrim, AnyLogic // *Вестник технологического университета*. 2019. Т. 22. № 4. С. 144–148.
20. Ahmadi M., Adewuyi O. B., Danish M. S. S., Mandal P., Yona A., Senjyu T. Optimum coordination of centralized and distributed renewable power generation incorporating battery storage system into the electric distribution network // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021. Vol. 125. P. 106458. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106458>.
21. Leithon J., Werner S., Koivunen V. Cost-aware renewable energy management: centralized vs. distributed generation. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 147. P. 1164–1179. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.077>.
22. Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G., Sokolov D., Zhou Bin. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach // *Applied Energy*. 2022. Vol. 309. P. 118487. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118487>.

References

1. Wang Minli, Zhang Tao, Wang Peihong, Chen Xiaolong. An improved harmony search algorithm for solving day-ahead dispatch optimization problems of integrated energy systems considering time-series constraints. *Energy & Buildings*. 2020;229:110477. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110477>.
2. Asl D. K., Seifi A. R., Rastegar M., Mohammadi M. Optimal energy flow in integrated energy distribution systems considering unbalanced operation of power distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020;121:106132. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106132>.
3. Stennikov V., Voropai N., Barakhtenko E., Sokolov D. Digitalization of integrated energy systems. *Energobezopasnost' i energosberezhenie = Energy Safety and Energy Economy*. 2020;4:5-10. (In Russ.). <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-4-5-10>.
4. Voropai N. I., Stennikov V. A. Integrated smart energy systems. *Izvestiya Rossijskoj Akademii nauk. Energetika*. 2014;1:64-73. (In Russ.).
5. Chen Houhe, Zhang Yutong, Zhang Rufeng, Lin Chuqiao, Jiang Tao, Li Xue. Privacy-preserving distributed optimal scheduling of regional integrated energy system considering different heating modes of buildings. *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 237. P. 114096. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114096>.
6. Liu Wen Hui, Ho Wai Shin, Lee Ming Yang, Hashim H., Lim Jeng Shiun, Klemes J.J., et al. Development and optimization of an integrated energy network with centralized and decentralized energy systems using mathematical modelling approach. *Energy*. 2019;183:617-629. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.158>.
7. 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;1111(1):012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1111/1/012001>.
8. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent agents: theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*. 1995;10(2):115-152. <https://doi.org/10.1017/S0269888900008122>.
9. Fisher K., Müller J. P., Heimig I., Scheer A.-W. Intelligent agents in virtual enterprises. In: *The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology: Proceedings of the First International Conference*. London, UK; 1996, p. 205-224.
10. Gomes L., Vale Z., Corchado J. M. Microgrid management system based on a multi-agent approach: an office building pilot. *Measurement*. 2020;154:107427. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107427>.
11. Anvari-Moghaddam A., Rahimi-Kian A., Mirian M. S., Guerrero J. M. A multi-agent based energy management solution for integrated buildings and microgrid system. *Applied Energy*. 2017;203:41-56. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.007>.
12. Wang Lingfeng, Wang Zhu, Yang Rui. Intelligent multi-agent control system for energy and comfort management in smart and sustainable buildings. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012;3(2):605-617. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2178044>.
13. Ren Yi, Fan Dongming, Feng Qiang, Wang Zili, Sun Bo, Yang Dezhen. Agent-based restoration approach for reliability with load balancing on smart grids. *Applied Energy*. 2019;249:46-57. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.119>.
14. Khan M. W., Wang Jie, Xiong Linyun, Ma Meiling. Modelling and optimal management of distributed microgrid using multiagent systems. *Sustainable Cities and Society*. 2018;41:154-169. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.018>.
15. Kou Yu, Bie Zhaohong, Li Gengfeng, Liu Fan, Jiang Jiangfeng. Reliability evaluation of multi-agent integrated energy systems with fully distributed communication. *Energy*. 2021;224:120123. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120123>.
16. Najafi F., Frapp M. Stochastic optimization of comfort-centered model of electrical water heater using mixed integer linear programming. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020;42:100834. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100834>.
17. Moazeni F., Khazaei J. Optimal operation of water-energy microgrids; a mixed integer linear programming formulation. *Journal of Cleaner Production*. 2020;275:122776. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122776>.
18. Muravev D., Hu Hao, Rakhmangulov A., Mishkurov P. Multi-agent optimization of the intermodal terminal main parameters by using AnyLogic simulation platform: case study on the Ningbo-Zhoushan port. *International Journal of Information Management*. 2021;57:102133. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102133>.
19. Mokshin V. V., Kirpichnikov A. P., Maryashina D. N., Stadnik N. A., Zolotuhin A. V. Comparison of Stratum 2000, Simulink, and AnyLogic structural and simulation modeling systems. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2019;22(4):144-148. (In Russ.).
20. Ahmadi M., Adewuyi O. B., Danish M. S. S., Mandal P., Yona A., Senjyu T. Optimum coordination of centralized and distributed renewable power generation incorporating battery storage system into the electric distribution network. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021;125:106458. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106458>.
21. Leithon J., Werner S., Koivunen V. Cost-aware renewable energy management: centralized vs. distributed generation. *Renewable Energy*. 2020;147:1164-1179. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.077>.
22. Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G., Sokolov D., Zhou Bin. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach. *Applied Energy*. 2022;309:118487. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118487>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Барахтенко Евгений Алексеевич,
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

Майоров Глеб Сергеевич,
аспирант,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 21.07.2022; одобрена после рецензирования 19.09.2022; принята к публикации 05.12.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeny A. Barakhtenko,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Senior Researcher,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Gleb S. Mayorov,
Postgraduate Student,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 21.07.2022; approved after reviewing 19.09.2022; accepted for publication 05.12.2022.