

На правах рукописи



Майоров Глеб Сергеевич

**ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА ГЕНЕРИРУЮЩЕЙ МОЩНОСТИ
ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ В
ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ
МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПОДХОДА**

Специальность 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Иркутск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук
(ИСЭМ СО РАН)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Барахтенко Евгений Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра автоматизированных электроэнергетических систем, профессор
Суворов Алексей Александрович
кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение электроэнергетики и электротехники, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Братский государственный университет», г. Братск

Защита состоится: «30» января 2024 года в 9:00 ч на заседании диссертационного совета 24.1.118.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте ИСЭМ СО РАН: <https://isem.irk.ru/dissert2/case/DIS-2023-4/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.118.01,
доктор технических наук, доцент



Солодуша Светлана Витальевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Задача выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии в интегрированных энергетических системах (ИЭС) является сложной и перспективной, учитывая современные тенденции, формирующиеся в энергетической сфере. В развитых странах они проявляются по-разному, вместе с тем, общим трендом для них является смена технологической парадигмы в направлении повышения роли распределенной генерации, снижения приоритета централизованного управления и поиска компромиссных решений для субъектов, участвующих в процессе энергоснабжения¹. Наряду с развитием централизованного энергоснабжения, все более активно проявляется тенденция широкомасштабного развития распределенной генерации энергии², позволяющей активным потребителям принимать участие в своем энергоснабжении, в том числе обеспечивать поставку энергии в систему. Ситуация, сложившаяся в российской энергетике, характеризуется обострением организационного и технологического несоответствия в развитии и функционировании ее систем. Энергетика строилась под размещение производственных сил и вертикально-интегрированное управление. С начала реформирования энергетике иными стали отношения собственности, претерпела изменение система управления энергетикой, вместе с тем философия управления, технические системы остались прежними. Принципы формирования, управления и технологии функционирования, как и ранее, направлены на работу систем независимо друг от друга, учитывающие их локальные интересы, а не общие интересы энергосистемы и потребителей, включающих в себя потребности как обычных потребителей, так и активных потребителей с распределенными источниками энергии. Значительно усиливается конкуренция между централизованным и децентрализованным энергоснабжением, между крупной и распределенной генерацией энергии. Эта ситуация требует применения новых методов формирования энергетических систем и управления централизованно-распределенными источниками энергии, определяющих оптимальный баланс между ними. Необходимы организационные и технологические изменения, разработка новой концепции создания энергетических систем и управления ими, построенной на принципах сетцентричности с развитыми горизонтальными связями в технологическом отношении.

¹ Voropai, N.I. Methodological principles of constructing the integrated energy supply systems and their technological architecture / N.I. Voropai, V.A. Stennikov, E.A. Barakhtenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1111. – № 1. – 012001.

² Wang, X. Quantitative analysis of distributed and centralized development of renewable energy / X. Wang, N. Li, W. Sun, S. Xu, Z. Zhang // Global Energy Interconnection. – 2018. – Vol. 1. – № 5. – pp. 576-584.

С ростом численности городского населения, потребление энергии в городах составляет значительную часть общего конечного потребления энергии. Устойчивость городских энергетических систем играет ключевую роль в функционировании единой энергосистемы и сокращению выбросов углерода в атмосферу. Традиционно планирование систем городского электроснабжения, теплоснабжения, газоснабжения и холодоснабжения ведется отдельно. Однако с развитием распределенной и возобновляемой энергетики городские энергетические системы становятся все более и более связанными, поэтому требуются новые подходы для оптимального совместного планирования систем тепло-, холодо-, электро- и газоснабжения.

Создание ИЭС с активными потребителями и распределенными функциями управления, использующих совместно с традиционной генерацией возобновляемые источники энергии (ВИЭ), является перспективным направлением исследования. 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.

Степень изученности проблемы. ИЭС получили развитие в ряде европейских стран, таких как: Германия, Дания, Нидерланды, Финляндия, Франция, Швеция, а также в Китае^{3,4}. Изучением вопросов управления энергопотреблением в ИЭС занимаются многие иностранные ученые: Xiaoling Song, Yudong Wang, Zhe Zhang, Charles Shen, Feniosky Peña-Mora, Eduardo Alejandro Martínez Ceseña, Emmanouil Loukarakis, Nicholas Good, Pierluigi Mancarella, Changming Chen, Xueyan Wu, Yan Li, Xiaojun Zhu, Zesen Li, Jien Ma, Weiqiang Qiu, Chang Liu, Zhenzhi Lin, Li Yang, Qin Wang, Yi Ding, Houhe Chen, Yutong Zhang, Rufeng Zhang, Xue Li, Bonan Huang, Yong Wang, Chao Yang, Nikita Gupta, Seethalekshmi K, Stuti Shukla Datta, Hossein Shayeghi, Nicu Bizon и др.

Исследование вопросов проектирования ИЭС разного уровня представлены в работах Georgios Zisopoulos, Athanasios Nesiadis, Konstantinos Atsonios, Nikos Nikolopoulos, Driss Stitou, Adriana Coca-Orteg'on, Zhihao Chen, Styliani Avraamidou, Pei Liu, Zheng Li, Weidou Ni, Efstratios N. Pistikopoulos, Zhihui Zhang, Rui Jing, Jian Lin, Xiaonan Wang, Shan Xie, Yingru Zhao, Xian Biao Oh, Nor Erniza Mohammad Rozali, Peng Yen Liew, Jirí Jaromír Klemes, O. Siddiqui, I. Dincer,

³ Verhoeven, R. 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 / R. Verhoeven, E. Willems, V. Harcouët-Menou, E. De Boever // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 46. – pp. 58-67.

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

George N. Sakalis, Christos A. Frangopoulos, Natasa Nord, Live Holmedal Qvistgaard, Guangyu Cao и др.

В России различные вопросы, связанные с исследованием ИЭС, рассматривались в работах Баринова В.А., Лунина К.А., Редько И.Я., Жукова В. П., Барочкина Е.В., Колотилова Ю.В., Сулова К.В., Блинова А.М., Жуковского Ю.Л., Потапова В.В. и др. В ИСЭМ СО РАН исследованию вопросов управления, функционирования и проектирования ИЭС посвящены работы Воропая Н.И., Стенникова В.А., Барахтенко Е.А., Ефимова Д.Н., Войтова О.Н., Сендерова С.М.

Объектом исследования в диссертации является ИЭС, включающая системы электроснабжения, теплоснабжения, холодоснабжения и газоснабжения.

Предметом исследования является методика для определения рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии при развитии ИЭС.

Цель диссертационной работы: разработка методики для выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии при развитии ИЭС на основе мультиагентного подхода.

В диссертации поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ существующих методов для создания и управления ИЭС и изучение особенностей применения мультиагентного подхода для исследования ИЭС.

2. Разработка структуры мультиагентной системы (МАС) для исследования механизмов взаимодействия объектов в ИЭС при решении задачи ее развития.

3. Математическая постановка задачи выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников при развитии ИЭС и разработка соответствующих математических моделей.

4. Разработка методики для выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников при развитии ИЭС на основе мультиагентного подхода.

5. Анализ и выбор инструментальных программных средств для реализации МАС.

6. Разработка мультиагентных моделей ИЭС и логики поведения каждого типа агента системы при решении задачи развития ИЭС.

7. Практическая апробация разработанного методического и программного обеспечения на тестовых и реальных схемах ИЭС.

Научная новизна. В результате выполнения работы получены следующие новые научные результаты:

1. Предложена новая методика для выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников при развитии ИЭС на основе мультиагентного подхода. Данная методика позволяет рассматривать большое количество активных элементов со сложным поведением, в том числе распределенные источники энергии и активных потребителей с собственными источниками энергии. Также она позволяет проводить расчет одновременно для систем электро-, тепло-, газо- и хладоснабжения, и учитывать взаимодействие этих систем друг с другом в рамках ИЭС.

2. Разработана оригинальная структура МАС для исследования взаимодействия объектов ИЭС при решении задачи выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии при развитии ИЭС, определены основной состав и типы агентов МАС, их цели и задачи. Данная структура МАС позволяет рационально задействовать распределенную генерацию, активных потребителей и централизованные источники энергии в процессе энергоснабжения с учетом целесообразности преобразования одного вида энергии в другой при совместном функционировании систем электро-, тепло-, холодо- и газоснабжения в рамках ИЭС.

3. Выполнена математическая постановка задачи выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников в ИЭС, учитывающая зоны эффективности работы генерирующего оборудования и ограничения на выбросы вредных веществ в атмосферу. Разработаны математические модели основных агентов МАС, осуществляющих контроль и управление объектов ИЭС.

4. Разработан алгоритм формирования мультиагентной модели ИЭС в программной среде AnyLogic. На основании разработанного алгоритма в программной среде AnyLogic сформирована мультиагентная модель ИЭС в соответствии с разработанной схемой и предложенной структурой взаимодействия агентов в МАС. В этой модели представлены агенты отдельных технологических систем тепло-, электро-, газо- и холодоснабжения. Разработаны алгоритмы поведения каждого типа агента, определены выполняемые ими функции, а также реализованы логические взаимодействия агентов друг с другом.

5. Выполнена апробация разработанной методики выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии при развитии ИЭС с использованием мультиагентного подхода. Проведен ряд вычислительных экспериментов на двух различных схемах энергоснабжения для демонстрации работы блока расчета схемы (БРС) ИЭС и блока управления развитием (БУР) ИЭС.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности

2.4.5. Энергетические системы и комплексы:

п. 1. Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии в целом и их основного и вспомогательного оборудования. (пп. 1, 2, 4 новизны)

п. 2. Математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии. (п. 3 новизны)

п. 5. Разработки и исследования в области энергосбережения и ресурсосбережения при производстве тепловой и электрической энергии, при транспортировке тепловой, электрической энергии и энергоносителей в энергетических системах и комплексах. (п. 5 новизны)

Теоретическая значимость результатов диссертации заключается в разработке методики для выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников в ИЭС на основе мультиагентного подхода, которая позволит проводить расчет одновременно для систем электро-, тепло-, газо- и хладоснабжения, и учитывать взаимодействие этих систем друг с другом в рамках ИЭС. Также она позволит учитывать взаимодействие активных потребителей с энергосистемой и регулировать соотношение мощности от централизованных и распределенных источников энергии при решении задачи развития ИЭС.

Практическая значимость определяется разработкой программного прототипа МАС для выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников при развитии ИЭС в рамках разработанной методики и возможностью моделировать и исследовать реальные схемы энергоснабжения на базе этого прототипа. На практике данный программный прототип позволит разрабатывать схемы энергосистем с учетом интеграции и возрастающего влияния распределенной генерации и активных потребителей.

Методология и методы исследования: системный подход, методы системного анализа, имитационное моделирование, дискретно-событийное моделирование, математическое программирование, мультиагентный подход, теория графов, теория гидравлических цепей, теория электрических цепей, сопоставительный анализ принципов и особенностей создания ИЭС, методы обоснования создания ИЭС, методы управления развитием энергосистем с учетом активности потребителей и внедрением новейших технологий, методы тестирования

разработанных подходов на конкретных примерах ИЭС. Программная реализация мультиагентной модели ИЭС выполнялась на языке программирования Java.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новая методика для выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников при развитии ИЭС на основе мультиагентного подхода.

2. Оригинальная структура МАС для исследования механизмов взаимодействия объектов в ИЭС при решении задач ее развития.

3. Математические модели основных агентов, осуществляющих контроль и координацию объектов ИЭС.

4. Мультиагентная модель ИЭС и алгоритмы поведения агентов при решении задачи развития ИЭС.

5. Результаты исследования схем энергоснабжения ИЭС при решении задачи их развития.

Достоверность результатов работы. Уровень достоверности научных положений, изложенных в диссертационной работе, определяется их корректностью с точки зрения математических моделей и методов исследования систем энергоснабжения, применением положений из теории электрических цепей и теории гидравлических цепей.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на следующих научно-практических конференциях: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Повышение эффективности производства и использование энергии в условиях Сибири» (2019, 2020, 2021, 2022, 2023 гг.), Всероссийская молодежная конференция с международным участием «Системные исследования в энергетике» (2019, 2021, 2022 гг.), Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» (2019 г.), Международная конференция «Energy-21: Sustainable Development & Smart Management» (2020 г.), The 9th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE 2022), 4th International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2022), International Conference on Simplicity and Complexity in SMART Automatics and Energy Systems (SMART-SYSTEMS 2022).

Результаты работы применялись при выполнении:

- Проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН «Теоретические основы создания интегрированных интеллектуальных энергетических систем и управления ими», под руководством академика РАН В.А. Стенникова, рег. № АААА-А17-117030310432-9.

- Проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН «Теоретические основы, модели и методы управления развитием и функционированием интеллектуальных трубопроводных систем энергетики», под руководством академика РАН В.А. Стенникова (FWEU-2021-0002).

- Гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 20-38-90266 «Исследование свойств интегрированных энергетических систем на основе мультиагентного подхода», под руководством к.т.н. Е.А. Барахтенко.

- Проекта Российского научного фонда № 22-29-01611 «Интеллектуальный синтез цифрового двойника для проектирования интегрированных энергетических систем», под руководством академика РАН В.А. Стенникова.

Личный вклад. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит разработка моделей и методов, реализация и тестирование методов в программно-вычислительных комплексах. На защиту выносятся материалы, полученные лично соискателем.

Публикации. По теме исследования опубликованы 19 статей, из них: 6 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы (в том числе 3 статьи в журналах из категории К1 и 2 статьи в журналах из категории К2), 6 – в рецензируемых изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science Core Collection, 7 – в иных изданиях.

Объем и структура работы. Диссертация объемом 178 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 101 наименования, 4 приложений, основной текст изложен на 152 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выполняемой работы, формулируется цель исследования, а также ставятся задачи, необходимые для ее достижения. Формулируются научная новизна и основные положения, выносимые на защиту, приводится общая характеристика работы.

В первой главе работы выполнен анализ предметной области, которая охватывает вопросы, связанные с исследованием ИЭС.

В п. 1.1 рассмотрены основные принципы создания и преимущества ИЭС в сравнении с существующими энергетическими системами, приведены некоторые из современных методов и моделей управления ИЭС различного уровня.

В п. 1.2 рассмотрены различные современные методы для создания ИЭС с распределенной генерацией, приведены работы, в которых используются детерминированные

методы для проектирования ИЭС и работы, в которых используются стохастические методы, для того чтобы учесть неопределенность, которая возникает при разработке систем ИЭС с распределенной генерацией.

В п. 1.3 выполнен анализ возможности применения мультиагентного подхода для исследования ИЭС, рассмотрены основные преимущества и принципы создания МАС, приведен ряд работ, в которых мультиагентный подход успешно применяется для решения технических задач.

Из анализа предметной области можно сделать выводы о том, что всестороннее и детальное исследование и развитие ИЭС позволит в будущем создавать энергетические системы нового поколения, которые будут лишены недостатков энергетических систем, функционирующих в настоящее время. Таким образом, в работе ставится проблема выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии в ИЭС с учетом наличия распределенных источников энергии и множества активных потребителей.

Вторая глава посвящена разработке методики выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии при развитии ИЭС.

В п. 2.1 приводится **математическая постановка задачи** выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников при развитии ИЭС, которая заключается в минимизации затрат на энергоснабжение потребителей от наиболее экономичных источников энергии по оптимальным маршрутам доставки с учетом выполнения технологических и экологических (объем выбросов вредных веществ) ограничений и описание математических моделей основных агентов МАС, осуществляющих контроль и управление объектов ИЭС. Для расчета используется избыточная схема^{5,6} ИЭС. Заданными являются: электрическая, тепловая и газовая сеть, состоящие из множества участков $J \supset \{J_e \cup J_h \cup J_g\}$ и их пропускной способности, где $J_e \supset \{J_{ce} \cup J_{de}\}$ - это участки электрической сети, включающие линии электропередачи (ЛЭП) в централизованной системе J_{ce} и в распределенных системах J_{de} , $J_h \supset \{J_{ch} \cup J_{dh}\}$ - это участки тепловой сети, включающие тепловые магистрали (ТМ) в централизованной системе J_{ch} и в распределенных системах J_{dh} , и $J_g \supset \{J_{cg} \cup J_{dg}\}$ - это участки газовой сети, включающие газовые

⁵ Некрасова, О.А. Оптимальное дерево трубопроводной системы. / О.А. Некрасова, В.Я. Хасилев // Экономика и математические методы. – 1970. – Т. 4. – № 3. – С. 427-432.

⁶ Меренкова, Н.Н. Математические модели для оптимизации трассировки и структуры трубопроводных систем. / Н.Н. Меренкова // Вопросы прикладной математики. – 1977. – С. 145-158.

магистрالی (ГМ) в централизованной системе J_{cg} и в распределенных системах J_{dg} ; временной период $\tau \in [0; \Theta]$; источники энергии $I \supset \{I_{ce} \cup I_{de} \cup I_{ch} \cup I_{dh} \cup I_{cg} \cup I_{dc}\}$, включающие централизованные источники электроэнергии I_{ce} и распределенные источники электроэнергии $I_{de} \supset \{I_{der} \cup I_{dea}\}$, включающие источники в распределенных системах I_{der} и источники у активных потребителей I_{dea} , централизованные источники тепловой энергии I_{ch} и распределенные источники тепловой энергии $I_{dh} \supset \{I_{dhr} \cup I_{dha}\}$, включающие источники в распределенных системах I_{dhr} и источники у активных потребителей I_{dha} , централизованные источники природного газа I_{cg} и распределенные источники энергии холода I_{dc} у потребителей с заданным объемом, соответственно, вырабатываемой электроэнергии $P_e^{i,\tau}$, тепла $P_h^{i,\tau}$, холода $P_c^{i,\tau}$ и добычи природного газа $P_g^{i,\tau}$; потребители энергии $K \supset \{K_o \cup K_a\}$, состоящие из обычных потребителей $K_o \supset \{K_{oe} \cup K_{oh} \cup K_{oc} \cup K_{og}\}$, включающие потребителей электроэнергии K_{oe} , тепла K_{oh} , холода K_{oc} и газа K_{og} , и активных потребителей $K_a \supset \{K_{ae} \cup K_{ah} \cup K_{ac} \cup K_{ag}\}$ включающие активных потребителей электроэнергии K_{ae} , тепла K_{ah} , холода K_{ac} и газа K_{ag} , для каждого из которых задан объем спроса на энергию $H_r^{i,\tau} \supset \{H_{re}^{i,\tau} \cup H_{rh}^{i,\tau} \cup H_{rc}^{i,\tau} \cup H_{rg}^{i,\tau}\}$, включающие спрос на электроэнергию $H_{re}^{i,\tau}$, тепло $H_{rh}^{i,\tau}$, холод $H_{rc}^{i,\tau}$ и газ $H_{rg}^{i,\tau}$.

При поиске решения по развитию ИЭС требуется минимизировать функцию суммарных затрат на энергоснабжение потребителей от централизованных и распределенных источников энергии в ИЭС, имеющий вид:

$$C_n = C_p + C_t \rightarrow \min, \quad (1)$$

где C_p – суммарные затраты на производство электроэнергии, тепла, холода и затраты на добычу природного газа приведенные к году, руб.; C_t – суммарные затраты на доставку электроэнергии, тепла и газа потребителям приведенные к году, руб.

Суммарные затраты на производство энергии состоят из затрат на строительство генерирующего оборудования, затрат на выработку электроэнергии на централизованных и распределенных источниках электроэнергии, затрат на выработку тепловой энергии на

централизованных и распределенных источниках тепловой энергии, затрат на природный газ, затрат на выработку холода в чиллерных установках и постоянных эксплуатационных затрат:

$$C_p = \sum_{\tau=0}^{\Theta} \left[\left(\sum_{i \in I_{ce}} \alpha^i \left(k_1 \cdot C_k^i + (C_{ce} \cdot \rho(P_e^{i,\tau}) + v^i) \cdot P_e^{i,\tau} + C_{oe}^i \right) + \sum_{i \in I_{de}} \alpha^i \left(k_1 \cdot C_k^i + C_{de}^i \cdot P_e^{i,\tau} + C_{oe}^i \right) \right) + \right. \\ \left. + \left(\sum_{i \in I_{ch}} \alpha^i \left(k_1 \cdot C_k^i + (C_{ch} \cdot \rho(P_h^{i,\tau}) + v^i) \cdot P_h^{i,\tau} + C_{oh}^i \right) + \sum_{i \in I_{dh}} \alpha^i \left(k_1 \cdot C_k^i + C_{dh}^i \cdot P_h^{i,\tau} + C_{oh}^i \right) \right) + \right. \\ \left. + \left(\sum_{i \in I_{cg}} \alpha^i \left(k_1 \cdot C_k^i + (C_{cg} \cdot \rho(P_g^{i,\tau}) + v^i) \cdot P_g^{i,\tau} + C_{og}^i \right) \right) + \left(\sum_{i \in I_{dc}} \alpha^i \left(k_1 \cdot C_k^i + C_{dc}^i \cdot P_c^{i,\tau} + C_{oc}^i \right) \right) \right], \quad (2)$$

где α^i – состояние источника энергии (0 – не задействован, 1 – задействован); C_{ce} – затраты на выработку электроэнергии на централизованных источниках, руб.; C_{de}^i – затраты на выработку электроэнергии на распределенных источниках, руб.; C_{oe}^i – постоянные эксплуатационные затраты для источников электрической энергии, руб.; C_{ch} – затраты на выработку тепловой энергии на централизованных источниках, руб.; C_{dh}^i – затраты на выработку тепловой энергии на распределенных источниках, руб.; C_{oh}^i – постоянные эксплуатационные затраты для источников тепловой энергии, руб.; C_{cg} – затраты на добычу природного газа, руб.; C_{og}^i – постоянные эксплуатационные затраты для источников природного газа, руб.; C_{dc}^i – затраты на выработку энергии холода в чиллерных установках, руб.; C_{oc}^i – постоянные эксплуатационные затраты для чиллерных установок, руб.; C_k^i – капитальные затраты на реконструкцию действующих и строительство новых источников энергии, руб.; v^i – затраты за выбросы вредных веществ в атмосферу, зависят от типа источника энергии, руб.; ρ – коэффициент эффективности работы генерирующего оборудования централизованных источников энергии; k_1 – коэффициент возврата инвестиций для источников энергии. Переменными в задаче являются: объем вырабатываемой электрической энергии $P_e^{i,\tau}$, тепла $P_h^{i,\tau}$, газа $P_g^{i,\tau}$ и холода $P_c^{i,\tau}$.

Суммарные затраты на доставку энергии потребителям по сетям состоят из затрат на строительство сетевого оборудования, затрат на потери электроэнергии в ЛЭП, постоянных эксплуатационных затрат в электрических сетях, затрат энергии при перекачке теплоносителя, затрат на потери тепловой энергии в ТМ, постоянных эксплуатационных затрат в тепловых

сетях, затрат на потери газа в ГМ, а также постоянных эксплуатационных затрат в газовых сетях:

$$C_t = \sum_{\tau=0}^{\Theta} \left[\begin{aligned} & \left(\sum_{j \in J_e} \beta^j (k_2 \cdot C_k^j + C_{ue} \cdot \Delta P_e^{j,\tau} + C_{oe}^j) \right) + \\ & + \left(\sum_{j \in J_h} \beta^j (k_2 \cdot C_k^j + C_{ce} \cdot P_p^{j,\tau} + C_{uh} \cdot \Delta P_h^{j,\tau} + C_{oh}^j) \right) + \\ & + \left(\sum_{j \in J_g} \beta^j (k_2 \cdot C_k^j + C_{ug} \cdot \Delta P_g^{j,\tau} + C_{og}^j) \right) \end{aligned} \right], \quad (3)$$

где β^j – состояние участка сети (0 – не задействован, 1 – задействован); C_{ue} – удельные затраты на потери электрической энергии в ЛЭП, руб.; C_{uh} – удельные затраты на потери тепловой энергии в ТМ, руб.; C_{ug} – удельные затраты на потери газа в ГМ, руб.; C_{oe}^j – постоянные эксплуатационные затраты в электрических сетях, руб.; C_{oh}^j – постоянные эксплуатационные затраты в тепловых сетях, руб.; C_{og}^j – постоянные эксплуатационные затраты в газовых сетях, руб.; C_k^j – затраты на реконструкцию действующих и строительство новых участков сетей, руб.; $\Delta P_e^{j,\tau}$ – потери электроэнергии в ЛЭП, МВт; $P_p^{j,\tau}$ – затраты энергии при перекачке теплоносителя, Вт; $\Delta P_h^{j,\tau}$ – потери тепловой энергии в ТМ, Гкал/ч; $\Delta P_g^{j,\tau}$ – потери газа в ГМ, м³/ч; k_2 – коэффициент возврата инвестиций для участков сети. Переменными в задаче являются: потери электрической энергии $\Delta P_e^{j,\tau}$, тепловой энергии $\Delta P_h^{j,\tau}$, газа $\Delta P_g^{j,\tau}$; затраты электрической энергии при перекачке теплоносителя $P_p^{j,\tau}$.

При решении этой задачи должны выполняться следующие условия и ограничения:

- ограничения мощности на источниках тепловой, электрической, энергии холода:

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

- ограничение на резерв мощности в системе:

$$\sum_{i \in I_{ce}} P_e^{i,\tau} + \sum_{i \in I_{de}} P_e^{i,\tau} \geq \left(\sum_{i \in I_{ce}} P_e^{i,\tau} + \sum_{i \in I_{de}} P_e^{i,\tau} \right) \cdot \omega; \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I_{ch}} P_{h,ycm}^{i,\tau} + \sum_{i \in I_{dh}} P_{h,ycm}^{i,\tau} \geq \left(\sum_{i \in I_{ch}} P_h^{i,\tau} + \sum_{i \in I_{dh}} P_h^{i,\tau} \right) \cdot \omega; \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I_{cg}} P_{g,ycm}^{i,\tau} \geq \sum_{i \in I_{cg}} P_g^{i,\tau} \cdot \omega; \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I_{dc}} P_{c,ycm}^{i,\tau} \geq \sum_{i \in I_{dc}} P_c^{i,\tau} \cdot \omega, \quad (8)$$

где ω – коэффициент нормативного резерва мощности для источников энергии, $\omega \geq 1$; $P_{e,ycm}^{i,\tau}$ – суммарная установленная мощность на источниках электрической энергии, МВт; $P_{h,ycm}^{i,\tau}$ – суммарная установленная мощность на источниках тепловой энергии, Гкал/ч; $P_{g,ycm}^{i,\tau}$ – суммарная установленная мощность на источниках газа, м³/ч; $P_{c,ycm}^{i,\tau}$ – суммарная установленная мощность на источниках холода, МВт.

- ограничения на пропускную способность ЛЭП, ТМ и ГМ:

$$\underline{x}^j \leq x^{j,\tau} \leq \overline{x}^j, \quad j \in J, \quad (9)$$

где $x^{j,\tau}$ – пропускные способности участков сети.

- ограничения на финансовые вложения:

$$\sum_{i \in I} (\alpha^i \cdot C_k^i) + \sum_{j \in J} (\beta^j \cdot C_k^j) \leq C_{kn}, \quad (10)$$

где C_{kn} – ограничения на финансовые вложения для строительства или развития системы для рассматриваемого периода времени, руб.

- условия баланса вырабатываемой и потребляемой энергии:

$$\sum_{i \in I_{ce}} P_e^{i,\tau} + \sum_{i \in I_{de}} P_e^{i,\tau} \geq \sum_{i \in K_{oe}} H_{re}^{i,\tau} + \sum_{i \in K_{ae}} H_{re}^{i,\tau} + \sum_{j \in J_e} \Delta P_e^{j,\tau}; \quad (11)$$

$$\sum_{i \in I_{ch}} P_h^{i,\tau} + \sum_{i \in I_{dh}} P_h^{i,\tau} \geq \sum_{i \in K_{oh}} H_{rh}^{i,\tau} + \sum_{i \in K_{ah}} H_{rh}^{i,\tau} + \sum_{j \in J_h} \Delta P_h^{j,\tau}; \quad (12)$$

$$\sum_{i \in I_{cg}} P_g^{i,\tau} \geq \sum_{i \in K_{og}} H_{rg}^{i,\tau} + \sum_{i \in K_{ag}} H_{rg}^{i,\tau} + \sum_{j \in J_g} \Delta P_g^{j,\tau}; \quad (13)$$

$$\sum_{i \in I_{dc}} P_c^{i,\tau} \geq \sum_{i \in K_{oc}} H_{rc}^{i,\tau} + \sum_{i \in K_{ac}} P_{rc}^{i,\tau}. \quad (14)$$

Поскольку общая математическая постановка задачи выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников при развитии ИЭС не в полной мере учитывает интересы активных потребителей, а осуществляет минимизацию суммарных затрат для всей ИЭС, то для решения проблемы согласования

разнонаправленных интересов данная математическая постановка разбивается на составляющие для трех иерархических уровней: централизованная система; распределенные системы; системы энергопотребления. В зависимости от уровня решается задача смешанного целочисленного линейного программирования или задача смешанного целочисленного нелинейного программирования. Таким образом, за счет решения задачи минимизации суммарных затрат на каждом уровне и учета затрат на энергоснабжение активных потребителей в качестве ограничений, удастся учесть интересы активных потребителей и найти компромиссное решение для всех объектов ИЭС.

На каждом уровне в результате решения задачи минимизации суммарных затрат определяются затраты на производство единицы энергии, которые передаются в качестве цен на нижний иерархический уровень.

В п. 2.2 определен тип и архитектура управления разрабатываемой МАС. Разработана оригинальная структура МАС для исследования взаимодействия объектов ИЭС при решении задачи выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии. Разработаны блок-схемы взаимодействия агентов БРС ИЭС и БУР ИЭС.

В данном исследовании применяется **неоднородный тип МАС**, поскольку агенты представляют различные объекты ИЭС, отличающиеся по конструкциям и выполняемым функциям в системе. Агенты разделены на следующие типы: агенты обычных потребителей (АОП); сетевой агент централизованной системы (САЦС); агенты источников энергии, которые подразделяются на агентов централизованных источников энергии (АЦИЭ) и агентов распределенных источников энергии (АРИЭ); агенты участков сетей, которые подразделяются на агентов участков магистральных сетей (АУМС) и агентов участков сети распределенных систем (АУСРС); агенты активных потребителей (ААП); сетевые агенты распределенных систем (САРС); агент развития (АР), который включает вспомогательных локальных агентов: агент формирования расчетной схемы (АФРС), агент анализа результатов (ААР), агент данных (АД). Каждый из перечисленных типов агентов имеет свои собственные цели и задачи, это обуславливает существенные отличия их внутренней конструкции, представленной индивидуальной структурой, знаниями предметной области, входными и выходными данными, выполняемыми действиями и др.

Укрупненная структура МАС, разработанная для исследования взаимодействия объектов в ИЭС при решении задачи выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии, представлена на Рисунке 1.

По выполняемым функциям данная структура МАС разделяется на два больших блока: БУР ИЭС и БРС ИЭС. Все объекты в рассматриваемой ИЭС можно разделить на три группы:

потребители, сети и источники энергии. Каждый объект имеет своего агента, отражающего его поведение в системе, связи с другими агентами, характеристики, параметры и индивидуальные ограничения. В БУР ИЭС находится АР и его вспомогательные локальные агенты: АФРС; ААР; АД. Агенты БУР ИЭС осуществляют подготовку данных для расчета схемы на разные периоды времени, производят формирование избыточной схемы ИЭС и отправляют необходимые данные в БРС ИЭС, затем производят анализ полученных данных по найденному решению развития ИЭС на долгосрочный период, также они создают таблицы с базой данных полученных решений за разные периоды времени и выводят статистику пользователям в виде графиков и диаграмм.

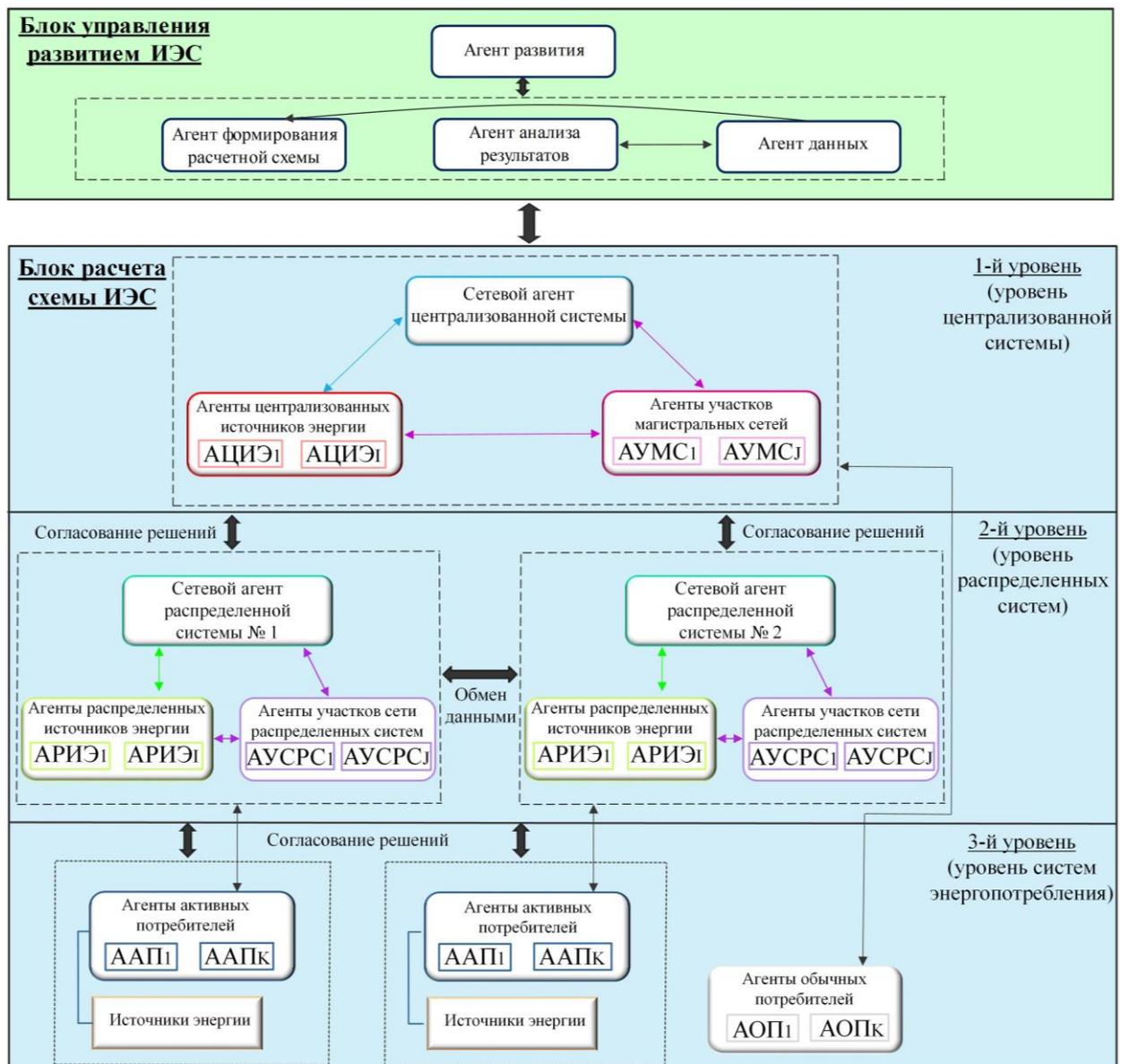


Рисунок 1 – Укрупненная структура мультиагентной системы

Иерархия взаимодействия агентов в БРС ИЭС описывается тремя уровнями: 1-й уровень – уровень централизованной системы; 2-й уровень – уровень распределенных систем; 3-й

уровень – уровень систем энергопотребления. На первом уровне находятся АЦИЭ и АУМС, координацию и контроль за формированием решения для данной системы осуществляет САЦС. Он обменивается информацией с АР и САРС. На втором уровне находятся АРИЭ и АУРС, здесь координацию и контроль осуществляют САРС. Они в свою очередь обмениваются данными по сформированному решению с АР и САЦС. При необходимости САЦС и САРС осуществляют корректировку полученных решений. На третьем уровне находятся АОП, которые связаны с централизованной системой, и ААП, которые управляют собственными источниками энергии и обмениваются данными с агентами распределенных систем.

В п. 2.3 излагается **алгоритм поиска оптимальной траектории развития ИЭС на долгосрочный период** (Рисунок 2):

1. Загрузка исходных данных по рассматриваемой схеме ИЭС.
2. Формирование временных периодов для развития ИЭС, весь расчетный временной период 15 лет разделяется на временные периоды по 5 лет, а они в свою очередь на временные периоды по 1 году.
3. Проверка выполнения всех расчетов для заданных периодов времени по развитию ИЭС.
4. Подготовка данных схемы ИЭС для рассматриваемого периода времени.
5. Отправка подготовленных данных в блок расчета схемы ИЭС, где определяется оптимальная конфигурация ИЭС с учетом всех условий и системных ограничений.
6. Получение решения по расчету схемы ИЭС с использованием разработанной мультиагентной модели с учетом требуемой нагрузки потребителей для данного периода времени.
7. Определение временного периода, для которого проводился расчет схемы ИЭС (15 лет или 5 лет):
 - для 15 лет, исходя из проведенного расчета, определяется перечень мероприятий по строительству объектов ИЭС (набор источников энергии и участков сети), которые необходимо выполнить за этот временной период. Подготавливаются данные для пятилеток.
 - для 5 лет и 1 года, исходя из проведенного расчета, определяются энергетические объекты, построенные в рассматриваемый период времени.
8. Проводится расчет затрат на строительство энергетических объектов для рассматриваемого периода времени и расчет суммарной установленной мощности генерирующего оборудования.
9. Осуществляется проверка наличия незапланированных событий и корректировка данных в случае их появления.

10. Алгоритм повторяется с 2 по 9 пункт до тех пор, пока все требуемые расчеты для рассматриваемых периодов времени с учетом уточнений и корректировок данных не будут выполнены.

11. При выполнении всех необходимых расчетов формируется оптимальная траектория развития ИЭС в соответствии с полученными решениями для каждого временного периода.

12. Результаты расчета выводятся пользователю в виде графиков и таблиц.

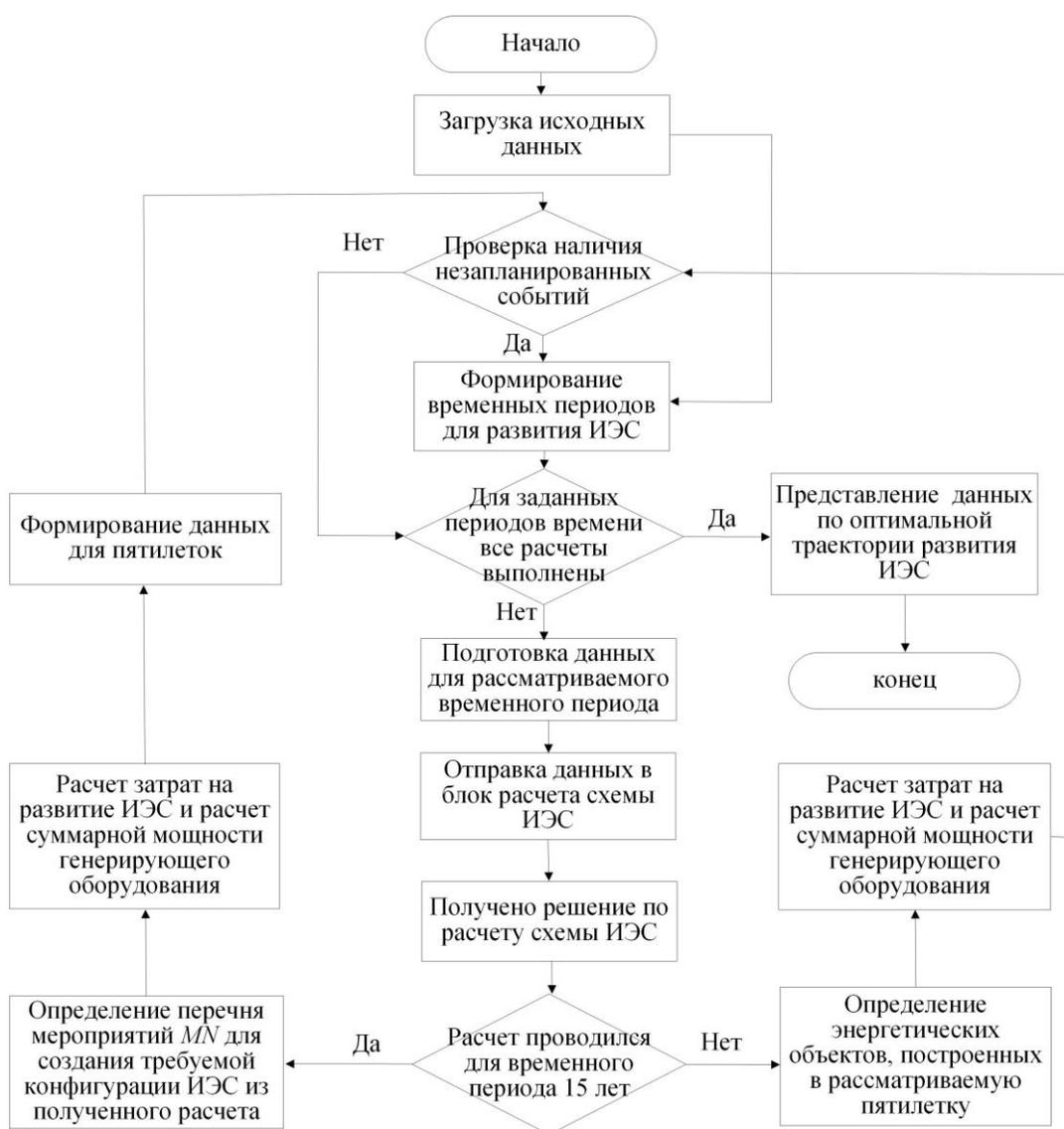


Рисунок 2 – Алгоритм поиска оптимальной траектории развития ИЭС

В п. 2.4 приводится описание разработанной **методики выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии при развитии ИЭС** с использованием мультиагентного подхода, которая представлена на Рисунке 3. Данная методика разбивается на два больших блока: БУР ИЭС и БРС ИЭС. В БУР ИЭС осуществляется подготовка данных для разных периодов времени, формируется расчетная схема ИЭС и ограничения для нее, производится анализ данных полученного решения по

рациональной структуре ИЭС, на основе проведенного анализа результатов формируются исходные данные для дальнейшего расчета с учетом найденных мероприятий M_N , производится расчет затрат на строительство объектов ИЭС, определяются суммарные мощности генерирующего оборудования в системе, рассчитываются выбросы вредных веществ в атмосферу для каждого временного периода и определяется наиболее оптимальная траектория развития ИЭС на весь период времени. В БРС ИЭС выполняется поиск компромиссного решения по выбору рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии ИЭС с учетом принятых критериев и системных ограничений на основе реализации взаимодействия агентов в МАС. Алгоритм поиска решения в БРС ИЭС имеет трехуровневую структуру, с соответствующим согласованием решений между ними. Выделены следующие уровни: системы энергопотребления; распределенные системы; централизованная система в ИЭС. В процессе нахождения компромиссного решения удастся учитывать интересы всех участников процесса энергоснабжения и формировать решения в рамках установленных договоренностей между централизованной системой и активными потребителями. Методика поиска решения включает четыре этапа:

- I этап – подготовка данных избыточной схемы ИЭС;
- II этап – формирование расчетной схемы ИЭС;
- III этап – поиск компромиссного решения по выбору рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии в ИЭС;
- IV этап – анализ полученных результатов расчета и поиск оптимального решения по развитию ИЭС на долгосрочный период.

Основные преимущества разработанной методики:

- все объекты ИЭС делятся на три группы: потребители, сети и источники энергии. Каждый объект имеет своего агента, отражающего его поведение в системе, связи с другими агентами, характеристики, параметры и индивидуальные ограничения. Каждый объект ИЭС через своих агентов участвует в формировании решения и отстаивает свои интересы, исходя из условий эффективного энергоснабжения;

- позволяет большую и сложную задачу разделить на несколько задач меньшей размерности с помощью делегирования различных функций множеству агентов, таким образом решение формируется несколькими независимыми центрами принятия решений;

- прямая и обратная связь между элементами ИЭС реализована путем организации связей агентов между собой для обеспечения их взаимодействия. Это позволяет каждому агенту, участвующему в поиске решения, использовать информацию о других агентах и корректировать свое решение, исходя из полученных данных;

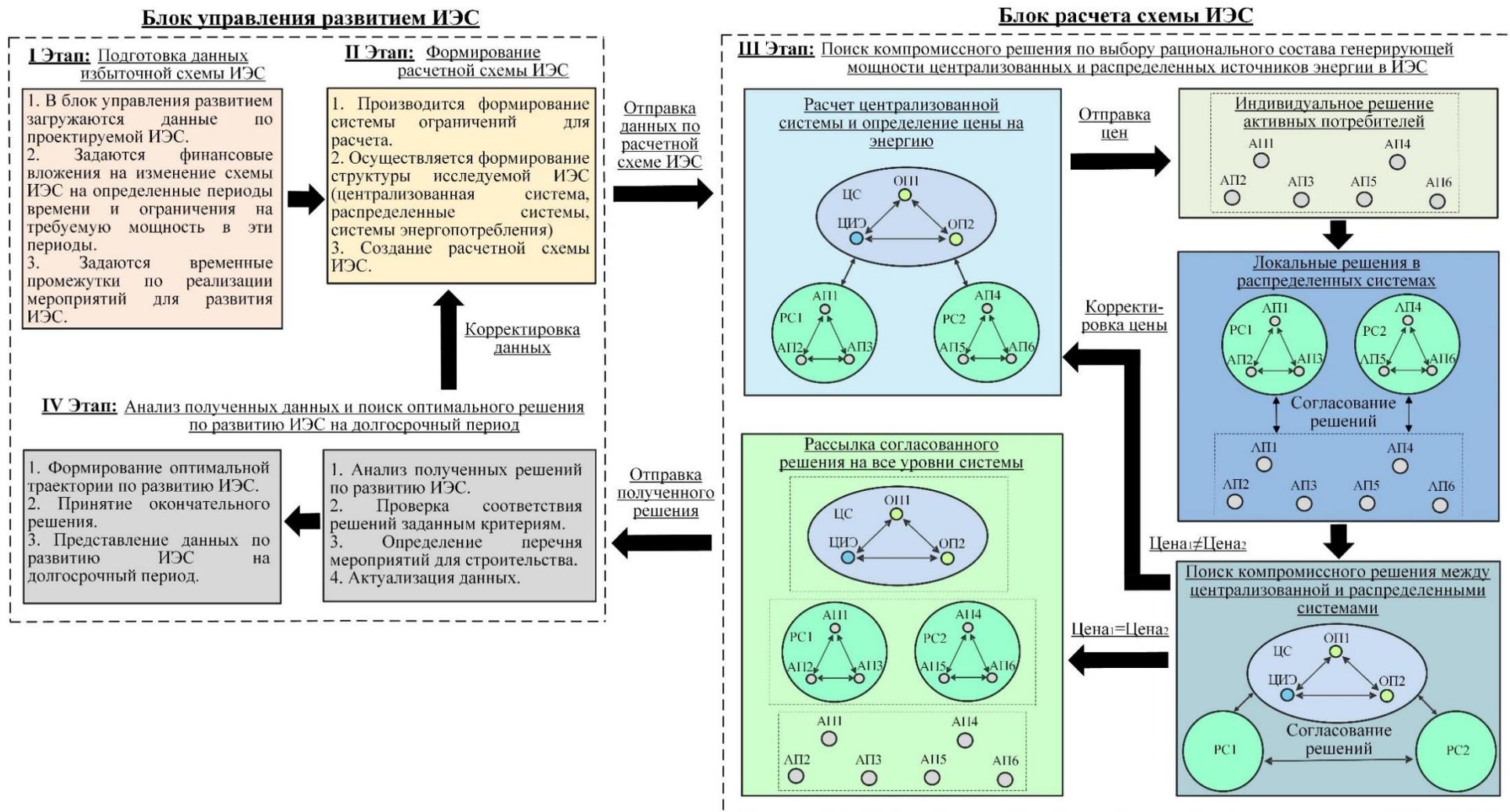


Рисунок 3 – Схематичное представление методики выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии в интегрированной энергетической системе на долгосрочный период: ОП-обычный потребитель; ЦИЭ-централизованный источник энергии; ЦС-централизованная система; АП-активный потребитель; РС-распределенная система.

- дает возможность учитывать соотношение количества энергии, производимой от распределенной генерации с учетом пропускных способностей сетей и зон эффективной работы генерирующего оборудования централизованных источников энергии;

- позволяет рассматривать большое количество активных элементов со сложным поведением, в том числе распределенные источники энергии и активных потребителей с собственными источниками энергии. В результате чего удастся рационально задействовать распределенную генерацию, активных потребителей и централизованные источники энергии в процессе энергоснабжения с учетом целесообразности преобразования одного вида энергии в другой при совместном функционировании систем электро-, тепло-, холодо- и газоснабжения в ИЭС;

- позволяет определять оптимальную траекторию развития ИЭС для расчетных периодов времени: 15 лет; 5 лет; 1 год;

- позволяет учитывать факторы, которые могут появиться случайно в процессе развития ИЭС и их невозможно сразу учесть при расчете на долгосрочный период;

- позволяет подключать различные модели для решения задач в зависимости от цели исследований;

- на практике данная методика позволит разрабатывать схемы ИЭС с учетом возрастающего влияния распределенной генерации и активных потребителей.

В третьей главе рассмотрены основные этапы создания мультиагентной модели ИЭС в программной среде AnyLogic.

В п. 3.1 выполнен анализ программного обеспечения для реализации мультиагентной модели ИЭС. Из представленных вариантов в качестве программной среды выбрана платформа AnyLogic, которая включает в себя базовые компоненты агентного моделирования, а также концепции и средства из классических областей имитационного моделирования. Программная среда AnyLogic разработана российской компанией The AnyLogic Company, она позволяет расширять созданные модели с помощью языка программирования Java, что предоставляет более широкие возможности при моделировании различных объектов и систем.

В п. 3.2 излагается алгоритм формирования мультиагентной модели ИЭС в программной среде AnyLogic и описание основных этапов этого алгоритма. Оценка работоспособности разработанного подхода и исследование взаимодействия элементов ИЭС выполнялись на тестовой схеме, представленной на Рисунке 4. Эта схема позволяет наглядно представить поведение агентов и взаимодействие между ними при решении задачи выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников в ИЭС. Рассматриваемая тестовая схема ИЭС, включает в себя следующие объекты: 5 обычных потребителей; 7 активных потребителей; 7 электрических бойлеров для выработки тепловой

энергии; 7 установок с солнечными панелями для выработки электрической энергии; 12 чиллерных установок для выработки хладоэнергии; 29 линий электропередачи; 24 тепловые магистрали; 25 газовых магистралей; источник комбинированной выработки тепловой и электрической энергии – ТЭЦ; источники электрической энергии – ГЭС и КЭС; источники тепловой энергии в виде двух централизованных котельных; газораспределительная станция для подготовки газа нужных параметров и отправки его потребителям. В соответствии с разработанным алгоритмом в программной среде AnyLogic сформирована мультиагентная модель ИЭС, основанная на описанной схеме и структуре МАС. В этой модели представлены агенты отдельных технологических систем тепло-, электро-, газо-, холодоснабжения и выполнено описание взаимодействия этих агентов между собой.

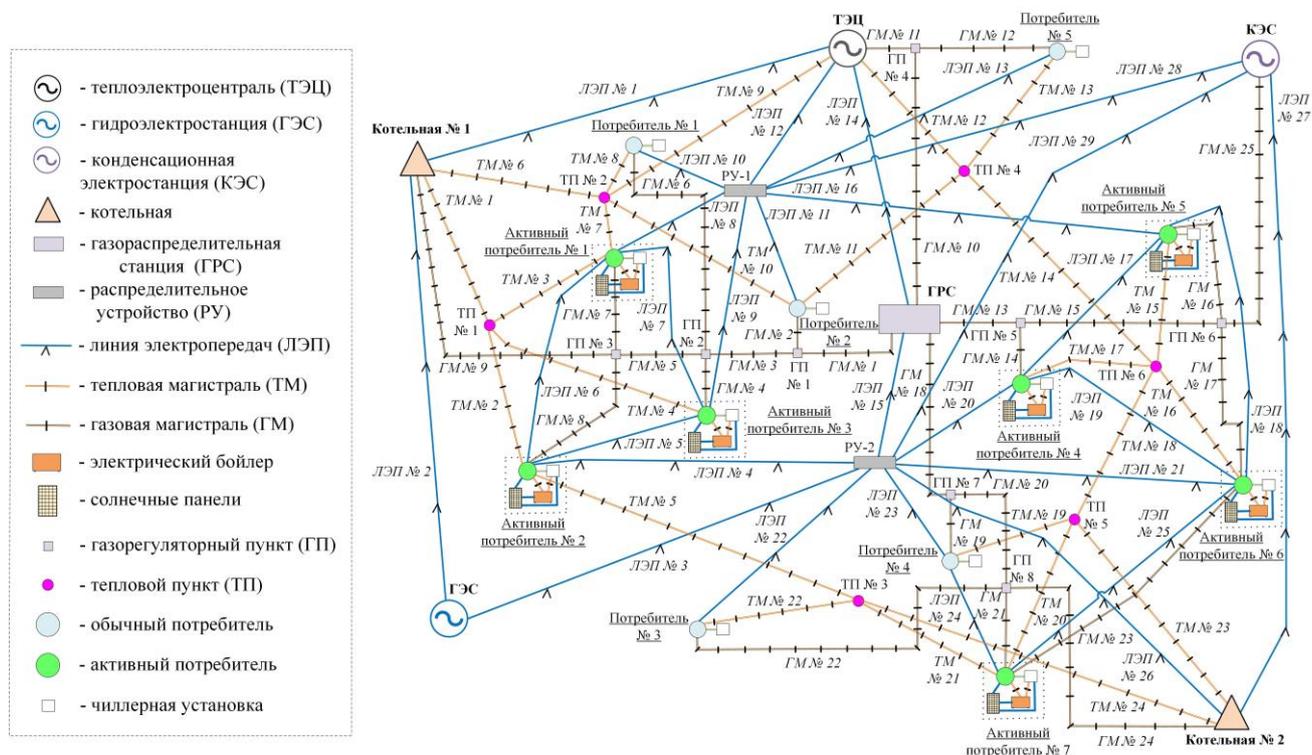


Рисунок 4 – Тестовая схема интегрированной энергетической системы

В п. 3.3 приводится описание алгоритмов поведения каждого типа агента, выполняемые ими функции и логические взаимодействия их с другими агентами с помощью блок-схем диаграмм состояний.

В четвертой главе рассмотрены вычислительные эксперименты, проведенные на тестовой и реальной схеме энергоснабжения для демонстрации работы БРС ИЭС и БУР ИЭС.

В п. 4.1 приводится ряд вычислительных экспериментов, проведенных на тестовой схеме ИЭС. В результате проведенных расчетов на разработанной модели было найдено рациональное решение по выбору наиболее приемлемой конфигурации ИЭС до 21,5 года, отражающей интересы, предпочтения и возможности активных потребителей и всей ИЭС с

учетом системных условий и ограничений. В рамках заданных капиталовложений осуществлен выбор наиболее экономичных и экологически чистых источников энергии с учетом зон эффективности работы генерирующего оборудования. Наглядное представление сформированного решения отображено на Рисунке 5, задействованные в энергоснабжении участки сетей выделены соответствующим цветом (ЛЭП-синим цветом; ТМ-оранжевым цветом; ГМ-коричневым цветом). С помощью взаимодействия агентов и подключенных вычислительных компонентов в мультиагентной модели найдено компромиссное решение, в соответствии с которым сформированы и реализованы необходимые меры по строительству сетевого и генерирующего оборудования. Суммарные затраты на строительство и энергоснабжение объектов ИЭС составили 130,811 млрд. руб.

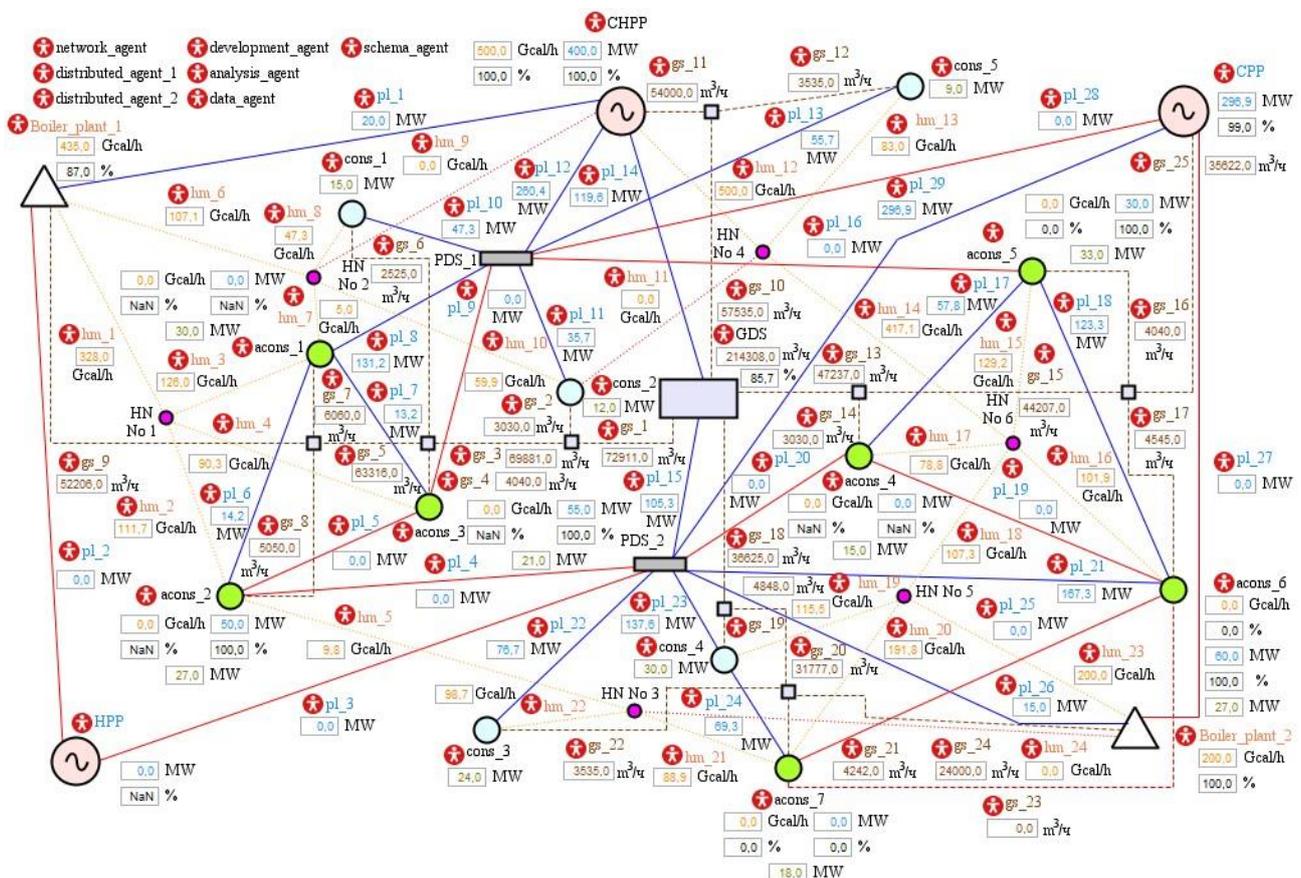


Рисунок 5 – Результаты расчета интегрированной энергетической системы

Проведенный вычислительный эксперимент показывает работоспособность и эффективность предложенных принципов и механизмов для решения задачи развития в ИЭС. В результате выполненного эксперимента на разработанной мультиагентной модели удалось сформировать оптимальную схему ИЭС для энергоснабжения потребителей с учетом системных условий и ограничений.

В п. 4.2 приводятся результаты исследований, выполненных на основании реальной системы энергоснабжения микрорайона Академгородок г. Иркутска. За основу взяты

функционирующие в настоящее время схемы электро- и теплоснабжения, но в то же время для рассмотрения одного из возможных вариантов их развития добавлены активные потребители со своими электрическими и тепловыми источниками энергии. Связь между тепловой и электрической системами осуществляется через электрические бойлеры, установленные у активных потребителей, что позволяет при необходимости преобразовывать электрическую энергию в тепловую для покрытия дефицита мощности. Результаты расчета для потребителей приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета для потребителей

Имя	$H_{rh}^{i,\tau}$, Гкал/ч	$H_{re}^{i,\tau}$, МВт	C_h , руб.	C_e , руб.	$\sum C$, руб.
Акт. потребитель № 1	3,55	2,52	98406	172748	271154
Потребитель № 2	5,06	3,78	198919	125738	324657
Акт. потребитель № 3	2,12	1,80	63040	116129	179169
Потребитель № 4	6,61	3,94	259852	131060	390912
Акт. потребитель № 5	4,76	2,74	134346	211217	345563
Акт. потребитель № 6	3,91	3,52	114297	221568	335865
Потребитель № 7	3,82	2,50	150172	83160	233332
Потребитель № 8	3,40	1,84	133661	61206	194867
Потребитель № 9	3,40	2,48	133661	82495	216156
Акт. потребитель № 10	2,14	1,48	59321	103150	162471
Акт. потребитель № 11	3,06	2,82	91763	168534	260297
Потребитель № 12	6,58	3,10	258673	103118	361791
Акт. потребитель № 13	4,08	2,83	116182	204745	320927
Потребитель № 14	9,00	7,30	353808	242827	596635
Акт. потребитель № 15	3,42	2,60	100835	182717	283552

где C_e - затраты на электроснабжение потребителей, C_h - затраты на теплоснабжение потребителей, $\sum C$ - суммарные затраты на энергоснабжение потребителей.

На основании проведенных расчетов выбраны распределенные источники энергии у активных потребителей. Суммарные затраты на энергоснабжение потребителей для первого и второго эксперимента составили соответственно 4,477 млн. руб. и 3,789 млн. руб. Экономия суммарных затрат на энергоснабжение для потребителей во втором эксперименте составила 15,37 %. Таким образом, благодаря учету эффективных режимов работы централизованных источников энергии с помощью системных ограничений удалось добиться значительного снижения затрат на энергию в целом по системе. 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 выполнения диссертационной работы достигнута поставленная цель: разработана методика для выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии при развитии ИЭС на основе мультиагентного подхода.

Автором получены следующие основные результаты:

1. Выполнен анализ существующих методов для создания и управления ИЭС и рассмотрены особенности применения мультиагентного подхода для исследования ИЭС. Мультиагентный подход является актуальным инструментом для моделирования и исследования ИЭС. Он позволяет рассматривать большое количество активных элементов со сложным поведением, в том числе распределенные источники энергии и активных потребителей с собственными источниками энергии.

2. Разработана оригинальная структура МАС для исследования взаимодействия объектов ИЭС при решении задачи выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии при развитии ИЭС. Данная структура МАС позволяет рационально задействовать распределенную генерацию, активных потребителей и централизованные источники энергии в процессе энергоснабжения с учетом целесообразности преобразования одного вида энергии в другой при совместном функционировании систем электро-, тепло-, холодо- и газоснабжения в рамках ИЭС.

3. Выполнена математическая поставка задачи выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников при развитии ИЭС, она заключается в минимизации затрат на энергоснабжение потребителей от наиболее экономичных источников энергии по оптимальным маршрутам доставки с учетом выполнения технологических и экологических ограничений. Разработаны математические модели основных объектов ИЭС.

4. Разработана новая методика для выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников энергии при развитии ИЭС на основе мультиагентного подхода. Данная методика позволяет проводить расчет одновременно для систем электро-, тепло-, газо- и хладоснабжения, и учитывать взаимодействие этих систем друг с другом в рамках ИЭС. Также она позволяет учитывать взаимодействие активных потребителей с энергосистемой и регулировать соотношение мощности от централизованных и распределенных источников энергии при решении задачи развития ИЭС.

5. Выполнен анализ программного обеспечения для реализации мультиагентного подхода. В качестве программной среды выбрана платформа AnyLogic, которая разработана

российской компанией The AnyLogic Company, она позволяет расширять созданные модели с помощью языка программирования Java, что предоставляет более широкие возможности при моделировании ИЭС.

6. В программной среде AnyLogic была сформирована мультиагентная модель ИЭС в соответствии с разработанной схемой и предложенной структурой взаимодействия агентов в МАС. В этой модели представлены агенты отдельных технологических систем тепло-, электро-, газо-, холодоснабжения. Разработаны алгоритмы поведения каждого типа агента, определены выполняемые ими функции, а также реализованы логические взаимодействия агентов друг с другом.

7. Выполнена практическая апробация разработанного методического и программного обеспечения для решения задачи развития ИЭС. Проведен ряд вычислительных экспериментов, анализ результатов которых показал эффективность и работоспособность предложенных принципов и механизмов при решении задачи выбора рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределенных источников при развитии ИЭС.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы:

1. Стенников, В.А. Разработка мультиагентной модели интегрированной энергоснабжающей системы в программной среде AnyLogic / В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко, Г.С. Майоров // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. – № 5. – С. 1080–1092.

2. Стенников, В.А. Применение мультиагентного подхода для моделирования интегрированных энергетических систем / В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко, Г.С. Майоров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22. – № 6. – С. 29-42.

3. Стенников, В.А. Управление распределением нагрузки между централизованной и распределенной генерацией в интегрированной энергетической системе с применением мультиагентных технологий / В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко, Г.С. Майоров // Промышленная энергетика. – 2021. – № 10. – С. 2-8.

4. Стенников, В.А. Распределение нагрузки между источниками в иерархической интегрированной энергетической системе с использованием мультиагентных технологий / В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко, Г.С. Майоров // Энергетик. – 2022. – № 11. – С. 39-44.

5. Стенников, В.А. Методический подход к построению программной платформы для управления развитием интегрированных энергетических систем / В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко, Д.В. Соколов, Г.С. Майоров // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 19-31.

6. Барахтенко, Е.А. Влияние распределенной генерации энергии на процесс энергоснабжения потребителей в интегрированной энергетической системе / Е.А. Барахтенко, Г.С. Майоров // iPolytech Journal. – 2022. – Т. 26. – № 4. – С. 612-625.

Публикации в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science Core Collection:

7. Stennikov, V. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach / V. Stennikov, E. Barakhtenko, G. Mayorov, D. Sokolov, B. Zhou // Applied Energy. – 2022. – Vol. 309. – P. 118487.

8. Stennikov, V. Principles of Building Digital Twins to Design Integrated Energy Systems / V. Stennikov, E. Barakhtenko, D. Sokolov, G. Mayorov // Computation. – 2022. – Vol. 10(12). – P. 222.

9. Stennikov, V. An approach to energy distribution between sources in a hierarchical integrated energy system using multi-agent technologies / V. Stennikov, E. Barakhtenko, G. Mayorov // Energy Reports. – 2023. – Vol. 9. – P. 856-865.

Публикации в трудах конференций, индексируемых Scopus:

10. Mayorov, G. Application of the multiagent approach to the research of integrated energy supply systems / G. Mayorov, V. Stennikov, E. Barakhtenko // E3S Web of Conferences: International Conference of Young Scientists “Energy Systems Research 2019”. – 2019. – Vol. 114. – 01006.

11. Stennikov, V. Research of a multiagent model of an integrated energy system developed in the AnyLogic software environment / V. Stennikov, G. Mayorov // E3S Web of Conferences: ENERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management. – 2020. – Vol. 209. – 03024.

12. Stennikov, V. Application of a multiagent approach for optimal load distribution between sources in an integrated energy system taking into account the operation of active consumers / V. Stennikov, E. Barakhtenko, G. Mayorov // E3S Web of Conferences: International Conference of Young Scientists “Energy Systems Research 2021”. – 2021. – Vol. 289. – 01010.

Публикации в других научных изданиях:

13. Майоров, Г.С. Применение мультиагентных технологий для исследования интегрированных энергоснабжающих систем / Г.С. Майоров, В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск: Изд-во ИРНТУ. – 2019. – Т. 2. – С. 412-416.

14. Майоров, Г.С. Разработка структуры мультиагентной системы для исследования интегрированной энергоснабжающей системы / Г.С. Майоров, В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко // Электроэнергетика глазами молодежи – 2019: материалы юбилейной X Междунар. науч.- практ. конф. Иркутск: ИРННТУ. – 2019. – Т. 3. – С. 132-134.

15. Стенников, В.А. Моделирование интегрированной энергоснабжающей системы с применением программной среды AnyLogic / В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко, Г.С. Майоров // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск: Изд-во ИРННТУ. – 2020. – Т. 2. – С. 213-216.

16. Стенников, В.А. Рациональное распределение энергии в интегрированной энергетической системе с использованием мультиагентных технологий / В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко, Г.С. Майоров // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск: Изд-во ИРННТУ. – 2021. – Т. 2. – С. 300-303.

17. Барахтенко, Е.А. Принципы построения интегрированной энергетической системы с использованием концепции "интернет энергии" / Е.А. Барахтенко, Г.С. Майоров // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск: Изд-во ИРННТУ. – 2022. – Т. 2 – С. 284-288.

18. Соколов, Д. Разработка программной платформы для создания цифровых двойников интегрированных энергетических систем / Д. Соколов, В. Стенников, Е. Барахтенко, Г. Майоров // Материалы IV Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенные сред. Иркутск: ИДСТУ СО РАН. – 2022. – С. 50-55.

19. Барахтенко, Е. Принципы построения цифрового двойника для решения задач проектирования интегрированных энергетических систем / Е. Барахтенко, В. Стенников, Д. Соколов, Г. Майоров // Материалы IV Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенные сред. Иркутск: ИДСТУ СО РАН. – 2022. – С. 36-42.

Отпечатано в типографии «Дубль Принт»

664046, г. Иркутск, ул. Волжская, 14, оф. 112

Заказ № 6051, тираж 110 экз.