



Автоматизация построения мультиагентной системы для проектирования интегрированных энергетических систем

© 2026, Е.А. Барахтенко ✉, Д.В. Соколов, Г.С. Майоров

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН), Иркутск, Россия

Аннотация

В статье предложен подход к автоматизации построения мультиагентной системы на базе онтологии, включающей описание агентов системы, программных компонентов, реализующих методы, алгоритмы и математические модели подсистем и элементов. Подход основан на концепциях модельно-управляемой разработки и разработки программного обеспечения на основе онтологии, которые адаптированы к особенностям мультиагентного моделирования интегрированных энергетических систем. В решаемой задаче информация разделена на многократно используемые знания и данные, описывающие её контекст. Программные агенты разработаны для многократного применения и не зависят от конкретных моделей оборудования. Их объединение с математическими моделями интегрированных энергетических систем и методами решения задач выполняется при построении мультиагентной системы. Приведено описание: архитектуры единой программной платформы; методики построения онтологии мультиагентной системы; методики автоматизированного построения мультиагентной системы для проведения вычислений при проектировании интегрированных энергетических систем. Представлены результаты применения подхода при проектировании интегрированной энергетической системы.

Ключевые слова: онтология, мультиагентная система, моделирование, автоматизация, интегрированная энергетическая система, проектирование.

Цитирование: Барахтенко Е.А., Соколов Д.В., Майоров Г.С. Автоматизация построения мультиагентной системы для проектирования интегрированных энергетических систем. *Онтология проектирования*. 2026. Т.16, №1(59). С.74-86. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-74-86.

Финансирование: исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант №24-29-00823).

Вклад авторов: Барахтенко Е.А. – концептуализация, методические основы; Соколов Д.В. – методология, исследование; Майоров Г.С. – подготовка данных, анализ результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Развитие новых технологий и внедрение инновационного энергетического оборудования оказывает значительное влияние на работу энергетических инфраструктур, включающих системы электро-, тепло-, холодо-, газоснабжения и др. [1]. Объединение этих систем на технологическом и организационном уровнях приводит к формированию интегрированных энергетических систем (ИЭС), которые обеспечивают повышение надёжности и эффективности ИЭС и рациональное использование энергетических ресурсов.

Сложность задачи проектирования ИЭС обусловлена особенностью сетевой конфигурации этих систем, множеством объектов с индивидуальным поведением, наличием ряда центров принятия решений и необходимостью согласования решений [2].

Применение мультиагентного подхода при решении задачи проектирования ИЭС позволяет рассматривать большое количество активных элементов, в т.ч. распределённые источники энергии, и активных потребителей с собственными источниками энергии [3-5]. В осно-

ве мультиагентного подхода лежит понятие мобильного программного агента. Решение задачи проектирования ИЭС осуществляется независимыми друг от друга центрами принятия решений, обменивающимися между собой информацией, а на этапе согласования находится компромиссное решение, учитывающее интересы всех участников энергоснабжения [6].

Сложность организации мультиагентного моделирования ИЭС приводит к необходимости разработки подходов, которые обеспечат автоматизацию построения мультиагентной системы (МАС). Эффективным средством автоматизации построения больших программных систем являются концепция модельно-управляемой разработки (*Model-Driven Engineering, MDE*) [7, 8] и концепция разработки программного обеспечения на основе онтологии (*Ontology Driven Software Engineering, ODSE*) [9, 10]. В статье сделана попытка применения этих концепций к особенностям процесса мультиагентного моделирования ИЭС. Автоматизация построения МАС выполняется на основе компьютерной модели ИЭС и знаний, формализованных в виде онтологии.

1 Постановка задачи

При проектировании ИЭС решается комплекс задач с разными содержательными формулировками, и для их решения используются различные методики, специализированное математическое и программное обеспечение [1, 11]. В [12] на примере трубопроводных систем энергетики показано, что в процессе их проектирования требуется интеграция различных подсистем. При построении МАС необходимо объединить составляющие, представленные на рисунке 1. Математическое обеспечение включает математические постановки задач проектирования, математические модели подсистем и элементов ИЭС, методы и алгоритмы. Программное обеспечение включает различные программные компоненты, которые реализуют методики решения задач проектирования ИЭС, математические модели подсистем и элементов ИЭС, методы и алгоритмы, а также сторонние решатели – программные разработки, предназначенные для решения конкретных классов задач.



Рисунок 1 – Составляющие в проектировании интегрированных энергетических систем

Структура МАС, отражающая особенности построения ИЭС, описывается тремя уровнями (рисунок 2) [6]: уровень централизованной системы; уровень распределённых систем; уровень систем энергопотребления. МАС является неоднородной, и при её построении используются агенты следующих типов:

- агент обычного потребителя;
- агент активного потребителя;

- сетевой агент централизованной системы;
- агенты источников энергии, которые подразделяются на агенты централизованных источников энергии и агенты распределённых источников энергии;
- агенты участков сетей, которые подразделяются на агенты участков магистральных сетей и агенты участков распределительных сетей;
- сетевые агенты распределённых систем.

Иерархическая модель ИЭС отражает структурную конфигурацию, состав оборудования и технические ограничения, которым должны соответствовать параметры спроектированной системы. Компьютерная модель ИЭС содержит объём информации, достаточный для формирования контекста решаемой задачи. Вместе с тем, при автоматизированном построении МАС необходимо использовать знания, которые не зависят от контекста решаемой задачи. Хранение этих знаний предлагается организовать в виде онтологии.

Онтологии всё больше вызывают интерес у специалистов [13, 14] и находят широкое применение при формализации знаний в инженерных системах [15, 16]. В [17] разработанные онтологии направлены на анализ энергетических систем, а в [18] содержат описание основных объектов энергетических сетей и цепочек спроса и предложения на энергию. Онтология используется для интерпретации информации, связанной с рынками электроэнергии [19]. В [20] онтологии рассматриваются как основа для формирования информационных моделей цифровых двойников объектов управления в распределённой энергетике. В [21] предлагается решение для онтологического моделирования децентрализованных данных в интеллектуальных энергетических системах. Фрактальный подход к структурированию знаний в энергетике используется для разработки онтологических пространств [22]. В [23] графически представлены онтологии, отражающие понятия ситуационного управления, включая ситуационный анализ и моделирование, а также онтологию возникающих ситуаций с точки зрения энергетической безопасности. В обзоре [24] обсуждаются вопросы проектирования программного обеспечения под управлением онтологий.

В концепции *MDE* модели предметных областей рассматриваются как информационные ресурсы для автоматического создания программных систем, а предметно-ориентированные языки позволяют создавать детальные описания предметных областей для автоматизации этапов разработки программного обеспечения [7]. В [25] предлагается подход к проектированию программного обеспечения для теплоснабжающих систем на основе *MDE*, используя технологии метапрограммирования и онтологии. В концепции *ODSE* онтологии используются для автоматизации построения сложных программных систем [26].

Концепции *MDE* и *ODSE* применимы для автоматизации построения МАС, предназначенной для решения задач проектирования ИЭС.

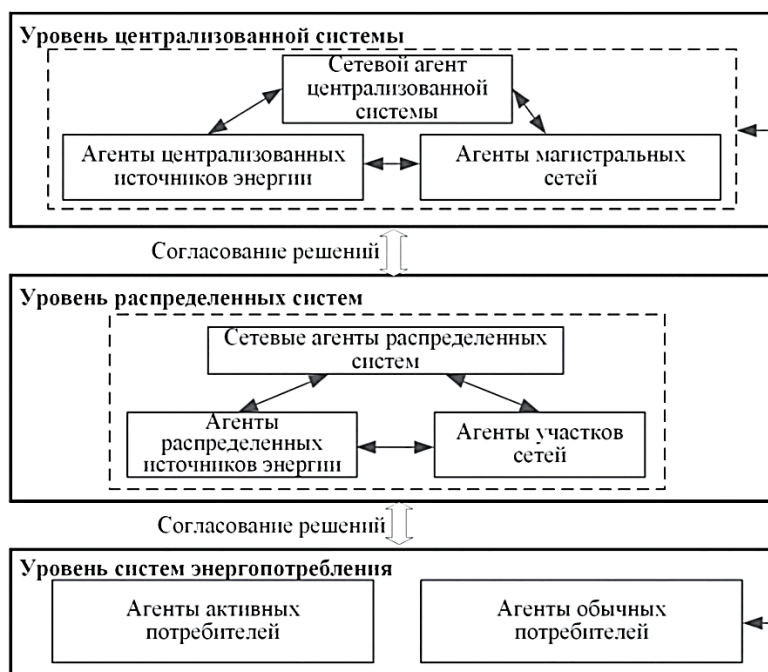


Рисунок 2 – Структура мультиагентной системы

2 Подход к автоматизации построения мультиагентной системы

Разработанный подход к автоматизации построения МАС для проектирования ИЭС с применением онтологии имеет ряд особенностей (см. рисунок 3):

- в основе лежат концепции *MDE* и *ODSE*, которые адаптированы к особенностям построения МАС;
- используемая при автоматизированном построении информация разделена на многократно используемые знания и данные, описывающие контекст решаемой задачи;
- многократно используемые знания хранятся в онтологии;
- данные, описывающие контекст решаемой задачи, извлекаются из модели ИЭС;
- агенты МАС разрабатываются для многократного применения и не зависят от конкретных моделей оборудования;
- настройка агентов выполняется в контексте построения МАС.



Рисунок 3 – Упрощённая схема предлагаемого подхода

Предлагаемая структура онтологии МАС (см. рисунок 4) включает описание: иерархии агентов и их связей с подсистемами ИЭС; прикладных задач и используемых для их решения методов; математических моделей подсистем ИЭС; программных реализаций математических моделей и методов.

При автоматизированном построении МАС используется компьютерная модель ИЭС, которая хранится в следующем виде:

- в реляционной базе данных, позволяющей сохранить описание подсистем и параметров элементов ИЭС;
- в универсальных форматах хранения данных, таких как *JSON* и *XML*.

Разработанный подход включает следующие составляющие:

- архитектуру единой программной платформы;
- методику построения онтологии МАС;
- методику автоматизированного построения МАС при проектировании ИЭС.

Мультиагентное моделирование выполняется на базе единой программной платформы, которая обеспечивает интеграцию всех необходимых для решения задачи проектирования ИЭС составляющих в контексте решения задачи. Архитектура платформы представлена на рисунке 5 и включает следующие элементы:

- компьютерную модель ИЭС;
- МАС, построитель МАС и онтологию МАС;
- библиотеку агентов;

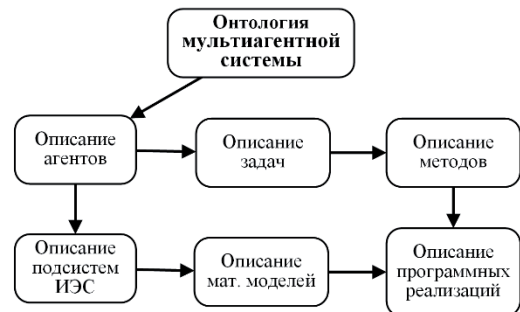


Рисунок 4 – Структура онтологии мультиагентной системы

- библиотеку математических моделей элементов ИЭС, используемых агентами;
- библиотеку решателей, используемых агентами.



Рисунок 5 – Архитектура программной платформы

Построение МАС автоматизировано на основе описания ИЭС, отражающего конфигурацию системы, знаний из онтологии МАС и программных компонентов, организованных в виде библиотек. Построитель МАС состоит из: построителя графа МАС; загрузчика агентов и программных компонентов; компоновщика МАС.

Построение МАС реализуется в результате выполнения трёх этапов.

На первом этапе выполняется построение графа (рисунок 6), отражающего структурную конфигурацию МАС и решаются следующие подзадачи.

- 1) анализ компьютерной модели ИЭС.
- 2) формирование перечня подсистем ИЭС.
- 3) формирование перечня используемого оборудования.
- 4) загрузка описания необходимых агентов из онтологии МАС.
- 5) формирование описания необходимых моделей элементов ИЭС.
- 6) формирование описания используемых методов.
- 7) построение графа, отражающего структурную конфигурацию МАС.

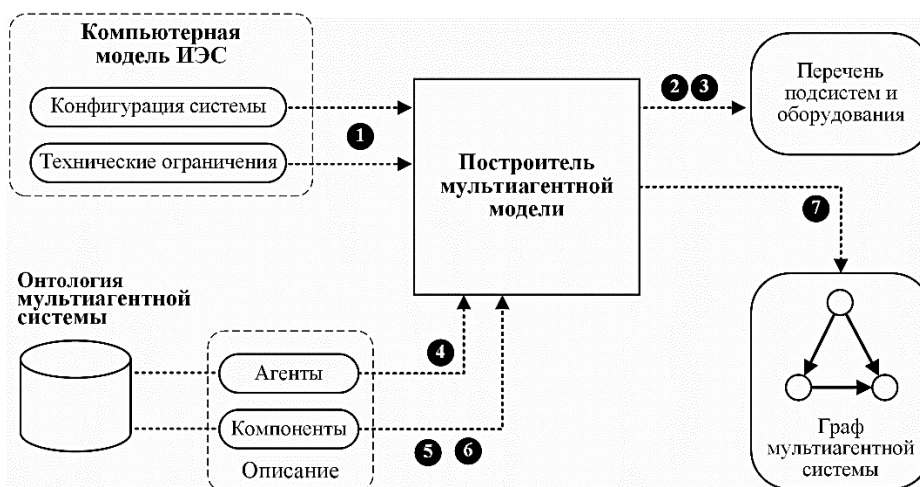


Рисунок 6 – Построение графа мультиагентной системы

На втором этапе выполняется автоматизированное построение МАС при проектировании ИЭС и решаются следующие подзадачи.

- 1) подключение агентов к формируемой МАС.
- 2) подключение программных компонентов, реализующих модели элементов ИЭС.
- 3) подключение программных компонентов, реализующих методы.
- 4) формирование структур данных для организации вычислительного процесса.
- 5) формирование среды, в которой функционируют агенты.

На третьем этапе выполняется автоматизированная настройка агентов на решение задачи моделирования, в ходе которой решаются подзадачи для агентов, которые используют:

- оборудование, устанавливаются связи с необходимыми моделями оборудования.
- методы, устанавливаются связи с необходимыми решателями.

В результате строится МАС, на базе которой решается проектная задача с учётом особенностей конфигурации моделируемой ИЭС, полученной из её компьютерной модели.

3 Методика построения онтологии мультиагентной системы

Построение онтологии включает следующие этапы.

- 1) формальное описание подсистем ИЭС, моделируемых агентами.

Для каждой подсистемы ИЭС формализуется описание отдельных энергетических систем, входящих в состав ИЭС (название, тип, назначение), и подсистем, образующих отдельные энергетические системы (название, тип, оборудование).

- 2) формальное описание агентов и используемых входных и выходных данных.

Для каждого типа агента формализуется описание следующих его характеристик:

- тип системы энергоснабжения;
- подсистема, которую он предназначен моделировать;
- параметры агента;
- характеристики оборудования, образующего моделируемую подсистему;
- входные и выходные данные для решаемой задачи.

Фрагмент онтологии МАС представлен на рисунке 7.

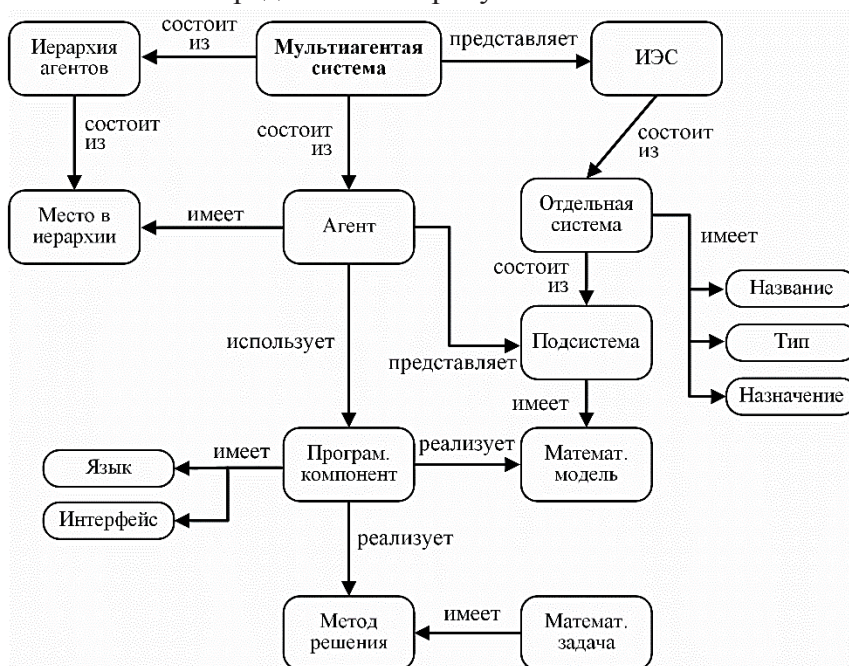


Рисунок 7 – Фрагмент онтологии мультиагентной системы

В таблице 1 представлены основные задачи для типов агентов и приведены некоторые данные, которыми обмениваются агенты.

Таблица 1 - Описание агентов

Типы агентов	Основные задачи	Данные
Агенты обычных потребителей	Собственное энергоснабжение	Нагрузки на электричество, тепло, холод и газ
Агенты активных потребителей	Расчёт собственного энергоснабжения, загрузка своего энергетического оборудования	Цены на энергию, пропускные способности участков сети, мощности источников, нагрузки: электричество, тепло, холод и газ
Агенты источников энергии	Оптимальная загрузка генерирующего оборудования	Цены на энергию, пропускные способности участков сети, мощности оборудования, капитальные вложения
Агенты участков сетей	Оптимальная загрузка сетевого оборудования	Пропускные способности и параметры участков сети, капитальные вложения
Сетевые агенты распределённых систем	Рациональное распределение нагрузки между источниками централизованной и распределённой генерации в распределённых системах	Цены на энергию, пропускные способности участков сети, мощности источников, нагрузки активных потребителей, затраты на энергоснабжение
Сетевой агент централизованной системы	Рациональное распределение нагрузки между источниками централизованной и распределённой генерации, и выбор рационального состава генерирующей мощности централизованных и распределённых источников в ИЭС	Цены на энергию, пропускные способности участков сети, мощности источников, нагрузки обычных и активных потребителей, затраты на энергоснабжение, капитальные вложения

3) Формальное описание связей между агентами в иерархической структуре МАС.

Формализуется описание:

- места в интегрированной системе, которое занимает моделируемая агентом подсистема;
- подсистем и элементов, с которыми связана моделируемая подсистема;
- агентов, моделирующих связанные подсистемы;
- типов сообщений и их структур, пересылаемых между определёнными типами агентов;
- уровней в иерархической МАС;
- принадлежности типа агентов уровням иерархической МАС.

4) Формальное описание используемых программных компонентов, реализующих математические модели, методы и алгоритмы.

Формализуется описание:

- типа внешнего компонента (математическая модель, алгоритм, оптимизатор);
- если тип внешнего компонента – алгоритм или оптимизатор, то для него указывается класс математической задачи и используемый метод решения;
- если тип внешнего компонента – математическая модель, то для него указывается подсистема ИЭС или оборудование, которое он моделирует;
- языка программирования, на котором выполнена реализация;
- интерфейса доступа к внешнему компоненту;
- форматов входных и выходных данных для внешних программных компонентов.

5) Формальное описание связей между агентами и программными компонентами.

Формализуется описание:

- необходимости использования внешних программных компонентов агентом;
- типа используемого внешнего программного компонента;
- названия программного компонента;
- метода доступа к программному компоненту.

Онтология МАС реализуется на базе предметно-ориентированного языка, основанного на языке XML. Необходимость разработки этого языка вызвана тем, что онтология имеет прикладное назначение и предназначена для применения в автоматизации построения МАС.

4 Пример применения

Описанный подход применён при автоматизированном построении МАС для решения задачи проектирования на примере тестовой схемы ИЭС.

На первом этапе выполнено формирование структур данных, необходимых для автоматизированного построения МАС и включающих описание конфигурации ИЭС, её подсистем (систем электро-, тепло-, холодо- и газоснабжения), оборудования подсистем, агентов, моделей элементов ИЭС и методов. На основе этих структур данных построен граф МАС.

На втором этапе в автоматизированном режиме построена МАС (рисунок 8).

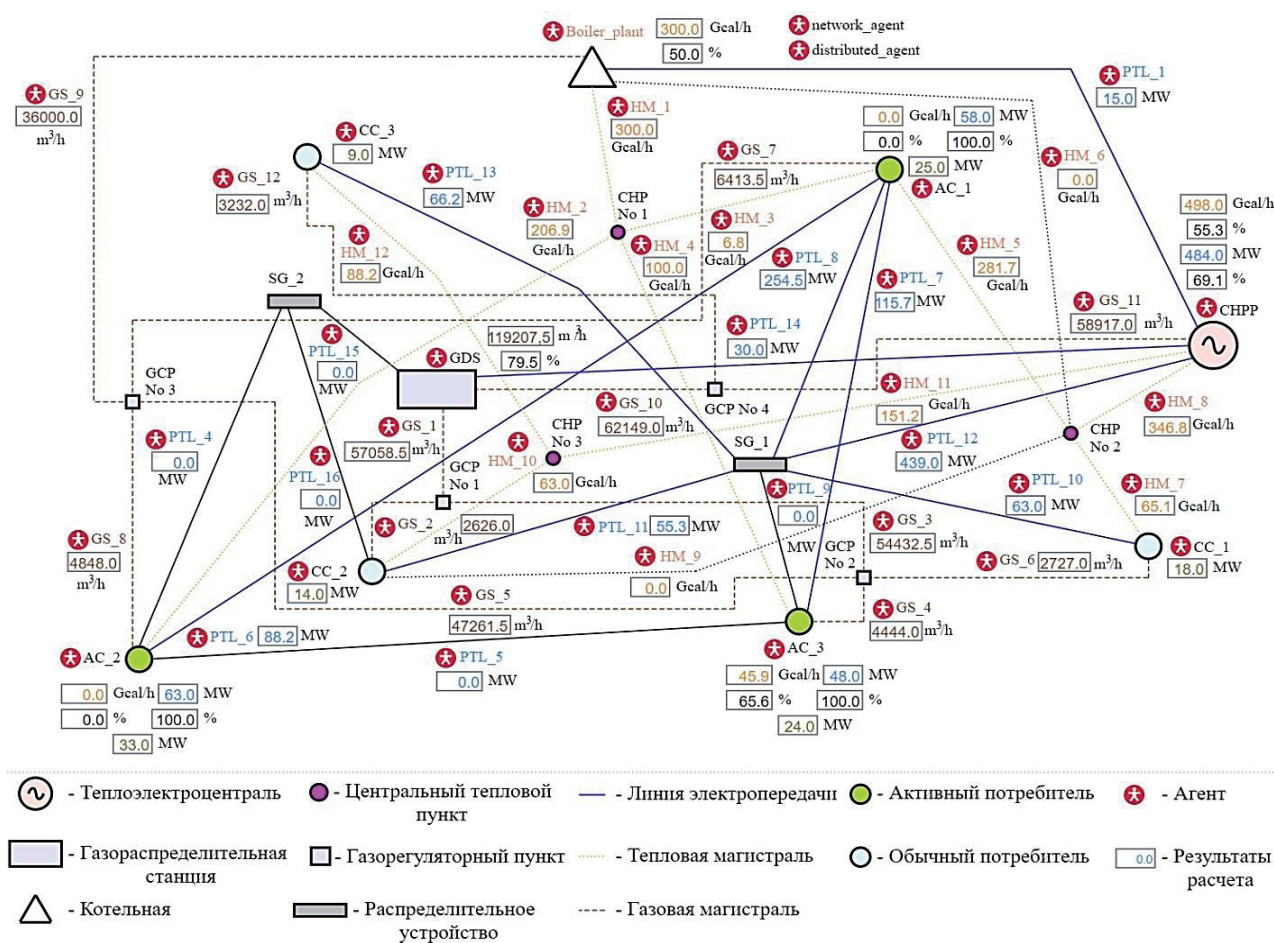


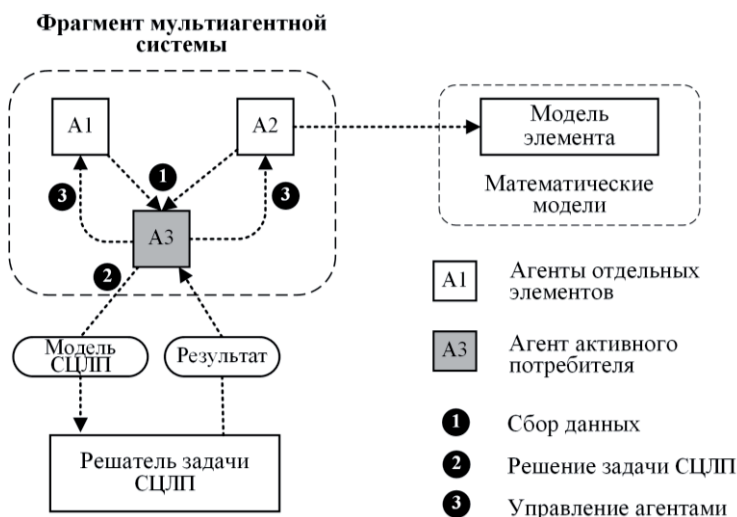
Рисунок 8 – Графическое представление построенной мультиагентной системы

Общее количество агентов 49, из них: 3 агента обычных потребителей; 3 агента активных потребителей; 3 агента централизованных источников энергии; 38 агентов участков сетей, включая 14 линий электропередачи, 12 тепловых магистралей и 12 газовых магистралей; 1 сетевой агент распределённой системы; 1 сетевой агент централизованной системы.

На третьем этапе выполнена автоматизированная настройка подключённых к МАС агентов на использование необходимых моделей оборудования (источников, участков сетей, систем энергопотребления) и решателей оптимизационных задач.

В процессе проведения мультиагентного моделирования выполняется решение задачи проектирования ИЭС путём взаимодействия агентов. При этом в зависимости от полученного агентом сообщения и логики его поведения может потребоваться выполнение оптимизационных расчётов, результаты которых используются для принятия решений. В этом случае выполняется вызов необходимого решателя, соответствующего математическому классу решаемой задачи. Выполнена автоматизированная настройка МАС на использование необходимых моделей оборудования и решателей оптимизационных задач.

Например, на рисунке 9 представлен фрагмент, отражающий схему взаимодействия агентов и использования программных компонентов. Агент А2 вызывает для проведения расчётов программные компоненты, реализующие модели элементов ИЭС. Агент А3, получив необходимую информацию от агентов А1 и А2, решает задачу управления своим энергопотреблением и рациональной загрузкой собственных энергоисточников. В данном случае решается задача смешанного целочисленного линейного программирования (СЦЛП) с использованием решателя.



Заключение

Мультиагентный подход к проектированию ИЭС позволяет найти решение задачи путём взаимодействия множества агентов. Автоматизация построения МАС позволяет устранить трудоёмкие этапы её формирования и настройки на особенности моделируемой ИЭС. В статье предложен подход к автоматизации построения МАС для проектирования ИЭС с применением онтологии, который включает следующие составляющие: архитектуру единой программной платформы; методику построения онтологии МАС; методику автоматизированного построения МАС для проведения вычислений при проектировании ИЭС. С использованием этого подхода выполнено построение МАС для тестовой схемы ИЭС.

Список источников

- [1] **Воропай Н.И., Стенников В.А.** Интегрированные интеллектуальные энергетические системы. *Известия РАН. Энергетика*. 2014. №1. С.64–73.
- [2] **Барахтенко Е.А., Воропай Н.И., Соколов Д.В.** Современное состояние исследований в области управления интегрированными энергетическими системами. *Известия РАН. Энергетика*. 2021, №4, с.4–23. DOI: 10.31857/S0002331021040026.
- [3] **Khan M.W., Wang J., Xiong L., Ma M.** Modelling and optimal management of distributed microgrid using multi-agent systems. *Sustain. Cities. Soc.*, 2018. Vol.41, 154–169. DOI: 10.1016/j.scs.2018.05.018.
- [4] **Li S., Hu W., Cao D., Chen Z., Huang Q., Blaabjerg F. et al.** Physics-model-free heat-electricity energy management of multiple microgrids based on surrogate model-enabled multi-agent deep reinforcement learning. *Applied Energy*, 2023. Vol.346, 121359. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121359.

- [5] **Zhang B., Hu W., Ghias A.M.Y.M., Xu X., Chen Z.** Two-timescale autonomous energy management strategy based on multi-agent deep reinforcement learning approach for residential multicarrier energy system. *Applied Energy*, 2023. Vol. 351, 121777. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121777.
- [6] **Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G., Sokolov D., Zhou B.** Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach. *Applied Energy*, 2022. Vol. 309, 118487. DOI:10.1016/j.apenergy.2021.118487.
- [7] **Silva da A.R.** Model-driven engineering: A survey supported by the unified conceptual model. *Comput. Lang. Syst. Struct.*, 2015. Vol.43. P.139–155. DOI: 10.1016/j.cl.2015.06.001.
- [8] **de Araújo Silva E., Valentin E., Carvalho J.R.H., da Silva Barreto R.** A survey of Model Driven Engineering in robotics. *Journal of Computer Languages*, 2021. Vol.62, 101021. DOI: 10.1016/j.cola.2020.101021.
- [9] **Wiebe A.J., Chan C.W.** Ontology driven software engineering. The 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Montreal, QC, Canada, 29 April – 02 May 2012. IEEE. 2012. DOI: 10.1109/CCECE.2012.6334938.
- [10] **Pan J.Z., Staab S., Afmann U., Ebert J., Zhao Y.** Ontology-Driven Software Development, Springer Berlin, Heidelberg. 2013. 338 p. DOI: 10.1007/978-3-642-31226-7.
- [11] **Stennikov V., Barakhtenko E., Sokolov D., Mayorov G.** Principles of Building Digital Twins to Design Integrated Energy Systems. *Computation*, 2022. Vol.10, 222. DOI: 10.3390/computation10120222.
- [12] **Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Соколов Д.В., Майоров Г.С.** Разработка онтологий для автоматизации вычислительных процессов при проектировании трубопроводных систем энергетики. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №4(50). С.548–561. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-548-561.
- [13] **Коголовский М.Р., Калиниченко Л.А.** Концептуальное и онтологическое моделирование в информационных системах. *Программирование*. 2009. Т.35. №5. С.3-25. EDN: LMAHLD.
- [14] **Боргест Н.М.** Системный и онтологический анализы: схожесть и различие понятий. *Онтология проектирования*. 2024. Т.14, №1(51). С.9–28. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-1-9-28.
- [15] **Загорулько Ю.А., Загорулько Г.Б.** Онтологический подход к разработке системы поддержки принятия решений на нефтегазодобывающем предприятии. *Вестник НГУ, серия «Информационные технологии»*. 2012. Т.10, №1. С.121-129.
- [16] **Ланшин В.** Онтологии в компьютерных системах. Издательство Научный мир, 2020. 224 с.
- [17] **Booshehri M., Emele L., Flugel S., Forster H., Frey J., Frey U. et al.** Introducing the Open Energy Ontology: Enhancing data interpretation and interfacing in energy systems analysis. *Energy and AI*, 2021. Vol.5. 100074. DOI: 10.1016/j.egyai.2021.100074.
- [18] **Devanand A., Karmakar G., Krdzavac N., Rigo-Mariani R., Eddy Y.S., Karimi, I.A. Kraft M.** OntoPowSys: A Power System Ontology for Cross Domain Interactions in an Eco Industrial Park. *Energy and AI*, 2020. Vol.1. 100008. DOI: 10.1016/j.egyai.2020.100008.
- [19] **Santos G., Pinto T., Vale Z., Praca I., Morais H.** Electricity markets ontology to support MASCEM’s simulations. *International conference on practical applications of agents and multi-agent systems*, Springer, 2016. P.393–404.
- [20] **Непша Ф.С., Андриевский А.А., Красильников М.И.** Онтология как основа для создания цифровых двойников объектов управления интеллектуальной распределённой энергетики. *Автоматизация в промышленности*. 2021. №1. С.27–33. DOI: 10.25728/avtprom.2021.01.04.
- [21] **Wu J., Orlandi F., AlSkaif T., O’Sullivan D., Dev S.** Ontology Modeling for Decentralized Household Energy Systems. 2021 *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, Vaasa, Finland, 2021. P.1–6. DOI: 10.1109/SEST50973.2021.9543327.
- [22] **Массель Л.В.** Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения. *Онтология проектирования*. 2016. Т.6, №2(20). С.149–161. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161.
- [23] **Массель Л.В., Ворожцова Т.Н., Пяткова Н.И.** Онтологический инжиниринг для поддержки принятия стратегических решений в энергетике. *Онтология проектирования*. 2017. Т.7, №1(23). С.66–76. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-66-76.
- [24] **Хорошевский В.Ф.** Проектирование систем программного обеспечения под управлением онтологий: модели, методы, реализации. *Онтология проектирования*. 2019. Т.9, №4(34). С.429–448. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-429-448.
- [25] **Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Соколов Д.В.** Применение онтологий при реализации концепции модельно-управляемой разработки программного обеспечения для проектирования теплоснабжающих систем. *Онтология проектирования*. 2014. №4(14). С.54–68.
- [26] **Gonzalez-Perez C.** How Ontologies Can Help in Software Engineering. *Lecture Notes in Computer Science*, 2017. Vol.10223. DOI: 10.1007/978-3-319-60074-1_2.

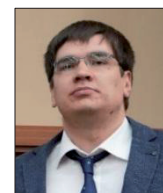
Сведения об авторах

Баракхтенко Евгений Алексеевич, 1982 г. рождения. Окончил Иркутский государственный технический университет (2005), к.т.н. (2011), учёный секретарь ИСЭМ СО РАН. Лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники для молодых учёных (2016). Область научных интересов: математические модели и методы управления развитием трубопроводных систем энергетики и интегрированных энергетических систем, цифровое проектирование. Автор и соавтор более 150 научных работ. Author ID (РИНЦ): 670523; Author ID (Scopus): 55229371000; Researcher ID (WoS): Q-7173-2016. barakhtenko@isem.irk.ru. ✉



Соколов Дмитрий Витальевич, 1984 г. рождения. Окончил Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского (2008), к.т.н. (2013), с.н.с. ИСЭМ СО РАН. Лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники для молодых учёных (2016). В списке научных трудов более 100 работ в области разработки алгоритмов оптимизации трубопроводных систем и автоматизации программирования. Author ID (РИНЦ): 710020; Author ID (Scopus): 57190607698; Researcher ID (WoS): K-6737-2018. sokolov_dv@isem.irk.ru.

Майоров Глеб Сергеевич, 1994 г. рождения. Окончил Иркутский национальный исследовательский технический университет (2018), к.т.н. (2024), н.с. ИСЭМ СО РАН. Область научных интересов: интегрированные энергетические системы и методы для решения задач их проектирования, мультиагентный подход и его применение. В списке научных трудов более 40 работ. Author ID (РИНЦ): 1001072; Author ID (Scopus): 57211071672; ORCID: 0000-0002-7405-1965. mayorovgs@isem.irk.ru.



Поступила в редакцию 20.06.2025, после рецензирования 23.10.2025. Принята к публикации 2.12.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-74-86

Automated construction of a multi-agent system for integrated energy system design

© 2026, E.A. Barakhtenko ✉, D.V. Sokolov, G.S. Mayorov

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract

This article presents an approach to automating the construction of a multi-agent system based on an ontology that describes system agents as well as software components implementing methods, algorithms, and mathematical models of subsystems and individual elements. The proposed approach is based on the concepts of model-driven development and ontology-based software development, adapted to the specific features of multi-agent modeling for integrated energy systems. Within the considered problem, information is divided into reusable knowledge and data describing its context. Software agents are designed for repeated use and remain independent of specific equipment models. During the construction of a multi-agent system, these agents are combined with mathematical models of integrated energy systems and problem solving methods. The article describes the architecture of a unified software platform, a methodology for developing a multi-agent system ontology, and a methodology for the automated construction of a multi-agent system to perform computational analyses in the design of integrated energy systems. The results obtained from applying the proposed approach to the design of an integrated energy system are also presented.

Keywords: ontology, multi-agent system, modeling, automation, integrated energy system, design.

For citation: Barakhtenko EA, Sokolov DV, Mayorov GS. Automated construction of a multi-agent system for integrated energy system design [In Russian]. *Ontology of designing*. 2026; 16(1): 74-86. DOI: 10.18287/2223-9537-2026-16-1-74-86.

Financial Support: The research was supported of Russian Science Foundation (Grant number no. 24-29-00823).

Authors' contribution: Barakhtenko E.A. – conceptualization, methodological foundations of the study; Sokolov D.V. – methodology, research; Mayorov G.S. – data preparation, results analysis.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and table

- Figure 1 – Components of integrated energy systems design
- Figure 2 – Structure of a multi-agent system
- Figure 3 – Simplified diagram of the proposed approach
- Figure 4 – Structure of the multi-agent system ontology
- Figure 5 – Architecture of the software platform
- Figure 6 – Construction of the multi-agent system graph
- Figure 7 – Fragment of the multi-agent system ontology
- Figure 8 – Graphical representation of the constructed multi-agent system
- Figure 9 – Example of organizing computations during agent interaction
- Table 1 – Description of agents

References

- [1] Voropai NI, Stennikov VA. Integrated smart energy systems [In Russian]. *Izvestiya RAS. Energetika*. 2014; 1: 64–73.
- [2] Barakhtenko EA, Voropai NI, Sokolov DV. Current state of research in the field of integrated energy systems control [In Russian]. *Izvestiya RAS. Energetika*. 2021; 4: 4–23. DOI: 10.31857/S0002331021040026.
- [3] Khan MW, Wang J, Xiong L, Ma M. Modelling and optimal management of distributed microgrid using multi-agent systems. *Sustain. Cities. Soc.* 2018; 41: 154–169. DOI: 10.1016/j.scs.2018.05.018.
- [4] Li S, Hu W, Cao D, Chen Z, Huang Q, Blaabjerg F. et al. Physics-model-free heat-electricity energy management of multiple microgrids based on surrogate model-enabled multi-agent deep reinforcement learning. *Applied Energy*. 2023; 346: 121359. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121359.
- [5] Zhang B, Hu W, Ghias AMYM, Xu X, Chen Z. Two-timescale autonomous energy management strategy based on multi-agent deep reinforcement learning approach for residential multicarrier energy system. *Applied Energy*. 2023; 351: 121777. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121777.
- [6] Stennikov V, Barakhtenko E, Mayorov G, Sokolov D, Zhou B. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach. *Applied Energy*. 2022; 309(118487). DOI:10.1016/j.apenergy.2021.118487.
- [7] Silva da AR. Model-driven engineering: A survey supported by the unified conceptual model. *Comput. Lang. Syst. Struct.* 2015; 43: 139–155. DOI: 10.1016/j.cl.2015.06.001.
- [8] de Araújo Silva E, Valentin E, Carvalho JRH, da Silva Barreto R. A survey of Model Driven Engineering in robotics. *Journal of Computer Languages*. 2021; 62: 101021. DOI: 10.1016/j.cola.2020.101021.
- [9] Wiebe AJ, Chan CW. Ontology driven software engineering. *Proceedings of the 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Montreal, QC, Canada, 29 April – 02 May 2012*. IEEE. 2012. DOI: 10.1109/CCECE.2012.6334938.
- [10] Pan JZ, Staab S, Afmann U, Ebert J, Zhao Y. *Ontology-Driven Software Development*, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-31226-7.
- [11] Stennikov V, Barakhtenko E, Sokolov D, Mayorov G. Principles of Building Digital Twins to Design Integrated Energy Systems. *Computation*. 2022; 10: 222. DOI: 10.3390/computation10120222.
- [12] Stennikov VA, Barakhtenko EA, Sokolov DV, Mayorov GS. Development of ontologies for automating computational processes in the energy pipeline system design [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(4): 548–561. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-548-561.
- [13] Kogalovskij MR, Kalinichenko LA. Conceptual and ontological modeling in information systems. *Programming*. 2009; 35(5): 3-25.
- [14] Borgest N.M. Systems and ontological analyses: similarities and differences between the concepts [In Russian]. *Ontology of designing*. 2024; 14(1): 9–28. DOI:10.18287/2223-9537-2024-14-1-9-28.
- [15] Zagorulko YuA, Zagorulko GB. Ontological approach to development of the decision support system for oil-and-gas production enterprise [In Russian]. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2012; 10(1): 121–129.
- [16] Lapshin V. Ontologies in computer systems [In Russian]. *Publishing house Scientific world*, 2020. 224 p.

- [17] **Booshehri M, Emele L, Flugel S, Forster H, Frey J, Frey U. et al.** Introducing the Open Energy Ontology: Enhancing data interpretation and interfacing in energy systems analysis. *Energy and AI*. 2021; 5: 100074. DOI: 10.1016/j.egyai.2021.100074.
- [18] **Devanand A, Karmakar G, Krdzavac N, Rigo-Mariani R, Eddy YS, Karimi IA, Kraft M.** OntoPowSys: A Power System Ontology for Cross Domain Interactions in an Eco Industrial Park. *Energy and AI*. 2020; 1: 100008. DOI: 10.1016/j.egyai.2020.100008.
- [19] **Santos G, Pinto T, Vale Z, Praca I, Morais H.** Electricity markets ontology to support MASCEM's simulations. *International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems, Springer*. 2016. P.393–404.
- [20] **Nepsha FS, Andrievsky AA, Krasilnikov MI.** Ontology as a basis for creating digital twins of control objects in intelligent distributed energy systems [In Russian]. *Automation in industry*. 2021; 1: 27–33. DOI: 10.25728/avtprom.2021.01.04.
- [21] **Wu J, Orlandi F, AISkaif T, O'Sullivan D, Dev S.** Ontology Modeling for Decentralized Household Energy Systems. *2021 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), Vaasa, Finland*. 2021: 1–6. DOI: 10.1109/SEST50973.2021.9543327.
- [22] **Massel LV.** Fractal approach to knowledge structuring and examples of its application [In Russian]. *Ontology of designing*. 2016; 6(2): 149–161. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161.
- [23] **Massel LV, Vorozhtsova TN, Pjatkova NI.** Ontology engineering to support strategic decision-making in the energy sector [In Russian]. *Ontology of designing*. 2017; 7(1): 66–76. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-66-76.
- [24] **Khoroshevsky VF.** Ontology Driven Software Engineering: Models, Methods, Implementations [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(4): 429–448. DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-429-448.
- [25] **Stennikov VA, Barakhtenko EA, Sokolov DV.** Usage of ontologies in the implementation of the concept of model-driven engineering for the design of heat supply systems [In Russian]. *Ontology of designing*. 2014; 4(14): 54–68.
- [26] **Gonzalez-Perez C.** How Ontologies Can Help in Software Engineering. *Lecture Notes in Computer Science*. 2017; 10223. DOI: 10.1007/978-3-319-60074-1_2.
-

About the authors

Evgeny Alekseevich Barakhtenko (b. 1982) graduated from Irkutsk State Technical University in 2005, PhD in Engineering (2011). Scientific Secretary at the Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Laureate of the Government of the Russian Federation Prize in Science and Technology for Young Scientists (2016). His scientific interests include mathematical models and methods for managing the development of pipeline energy systems and integrated energy systems, as well as digital design. He is the author and a co-author of more than 150 scientific papers. Author ID (RSCI): 670523; Author ID (Scopus): 55229371000; Researcher ID (WoS): Q-7173-2016. barakhtenko@isem.irk.ru. ✉

Dmitry Vitalevich Sokolov (b. 1984) graduated from Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky (Irkutsk, Russia) in 2008, PhD in Engineering (2013), Senior Researcher at Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Laureate of the Government of the Russian Federation Prize in Science and Technology for Young Scientists (2016). The list of scientific works includes more than 100 works in the field of optimisation algorithms development for pipeline systems and programming automation. Author ID (RSCI): 710020; Author ID (Scopus): 57190607698; Researcher ID (WoS): K-6737-2018. sokolov_dv@isem.irk.ru.

Gleb Sergeevich Mayorov (b. 1994) graduated from Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia) in 2018, PhD in Engineering (2024), Researcher at the Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Research interests include integrated energy systems and methods for solving their design problems, as well as multi-agent approach and its application. The list of scientific works includes more than 40 works. Author ID (RSCI): 1001072; Author ID (Scopus): 57211071672; ORCID: 0000-0002-7405-1965. mayorovgs@isem.irk.ru.

Received June 20, 2025. Revised October 22, 2025. Accepted December 2, 2025.
