

УДК 621.311.001.57

DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.002

## Методический подход к построению программной платформы для управления развитием интегрированных энергетических систем

Стенников Валерий Алексеевич, Барахтенко Евгений Алексеевич,

Соколов Дмитрий Витальевич, Майоров Глеб Сергеевич

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,

Россия, Иркутск, *mayorovgs@isem.irk.ru*

**Аннотация.** В настоящее время активно развивается направление, связанное с исследованием интегрированных энергетических систем. Это направление рассматривает различные типы систем (электро-, тепло-, хладо-, газоснабжения и др.), как подсистемы единой системы, и позволяет получить преимущества в сравнении с традиционными подходами к исследованию энергетических систем, в которых эти системы рассматриваются независимо друг от друга. В статье предложен методический подход к организации единого информационного пространства для решения задач развития интегрированных энергетических систем в виде единой программной платформы. Этот подход включает в себя следующие составляющие: принципы построения платформы; архитектуру платформы; технологии и инструментальные средства разработки для реализации платформы; базовую структуру библиотеки программных компонентов, их интерфейсы и механизмы интеграции в платформу. В процессе построения программной системы предложено использовать онтологии, которые используются для решения следующих задач: автоматическая интеграция программных компонентов в программную среду AnyLogic; автоматизированное построение программной системы для решения задачи управления развитием интегрированных энергетических систем; применение программной платформы при решении практических задач. В соответствии с предложенным методическим подходом реализован прототип программной платформы. Продемонстрировано решение задачи развития на примере схемы интегрированной энергетической системы. Представлены результаты вычислительного эксперимента на тестовой схеме интегрированной энергетической системы, который проведен с использованием разработанного программного прототипа. В результате выполненного эксперимента на разработанной мультиагентной модели удалось сформировать оптимальную схему интегрированной энергетической системы для энергоснабжения потребителей с учетом системных условий и ограничений.

**Ключевые слова:** интегрированные энергетические системы, мультиагентный подход, программная платформа, онтологии, моделирование

**Цитирование:** 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. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.002.

**Введение.** В настоящее время во всем мире широко развивается направление, связанное с исследованием интегрированных энергетических систем (ИЭС), поскольку данное направление рассматривает различные типы систем (электро-, тепло-, хладо-, газоснабжения и др.), как подсистемы единой системы и позволяет получить значительные преимущества, в сравнении с традиционными подходами к исследованию энергетических систем, в которых эти системы рассматриваются независимо друг от друга. Основными целями технологической интеграции и интеллектуализации энергетических систем являются достижение более высокого уровня управления с целью обеспечения высокого уровня комфорта в жилых, общественных и производственных зданиях, обеспечения экономичности энергоснабжения, снижения негативного воздействия на окружающую среду [1]. ИЭС сочетают многокомпонентность, эффективность, надежность, управляемость, гибкое использование технологий преобразования, транспорта, хранения энергии и предполагают участие активного потребителя в процессе энергоснабжения [2].

С ростом количества возобновляемых источников энергии и числа активных потребителей необходимы новые принципы построения энергетических систем и управления ими, учитывающие сложный характер поведения и взаимодействия объектов этих систем.

Решение комплекса задач управления развитием ИЭС необходимо выполнять в рамках единого информационного пространства на базе единой программной платформы. Для разработки такой платформы сформулированы следующие требования к методическому и информационно-вычислительному инструментарию для управления развитием ИЭС:

- моделирование интегрированных систем с различным составом входящих в них типов систем энергоснабжения, оборудования и набором графических и математических моделей;
- проведение научных исследований в области разработки методического обеспечения для решения задач управления развитием ИЭС;
- унифицированное представление данных, которое сделает возможным их использование при решении задач графического и математического моделирования ИЭС;
- организация единого информационного пространства на базе единой программной платформы;
- выполнение сложных инженерных расчетов по поиску оптимальных путей преобразования ИЭС с целью повышения эффективности и надежности их функционирования;
- учет при решении задач развития ИЭС наличия множества центров принятия решений по снабжению энергией различного вида с возможностью преобразования из одного вида в другой;
- необходимость рассмотрения большого количества элементов со сложным поведением.

На основе сформулированных требований сделан вывод о необходимости разработки единой программной платформы, для реализации которой требуется создание новых методических подходов к построению программного обеспечения (ПО). Методические подходы, традиционно применяемые при разработке ПО для моделирования систем энергетики, не могут быть использованы при реализации этой платформы, что вызвано следующими причинами.

1. Отсутствует возможность применения гибких схем организации вычислительного процесса и замены элементов программной системы, учета особенностей конкретной системы и используемого для ее построения широкого спектра энергетического оборудования.

2. Отсутствует четкое разделение на методы (алгоритмы, методики) решения прикладных задач и математические модели элементов систем энергетики. В результате программные модули, реализующие алгоритмы, становятся ориентированными на конкретные системы энергетики, классы задач и набор оборудования, что значительно затрудняет их настройку на конкретную решаемую задачу и многократное использование при построении различных программных систем.

3. Отсутствует возможность для исследователя создавать свои модели элементов и интегрировать их в ПО при проведении научных или инженерных расчетов. Происходит многократное дублирование одной и той же модели элемента системы в различных вычислительных модулях, поэтому в случае корректировки модели необходимо вносить изменения во все программные модули.

4. Схема взаимодействия между вычислительными модулями скрыта в программном коде управляющего модуля программной системы, что значительно затрудняет понимание и развитие алгоритма решения задачи. При возникновении необходимости любого преобразования управляющего алгоритма программной системы требуется внесение изменений в существующий или создание нового управляющего модуля.

**1. Методический подход к построению программной платформы.** В связи с развитием вычислительной техники и ее широким использованием при решении различных задач возникает потребность в теоретических работах по принципам разработки

программного обеспечения. При разработке программного обеспечения широко используются работы таких специалистов, как А.П. Ершов [3], Смит [4], Буч [5-6], Бек [7], Мартин [8], Фаулер [9] и др. В настоящее время активно разрабатываются подходы, ориентированные на автоматизацию этапов разработки программного обеспечения [10-11 и др.].

Разработан оригинальный методологический подход к построению программной платформы для решения задач проектирования ИЭС. Подход включает в себя следующие компоненты: 1) принципы построения платформы; 2) архитектуру платформы; 3) технологии и инструментальные средства разработки для реализации платформы; 4) базовую структуру библиотеки программных компонентов, их интерфейсы и механизмы интеграции в платформу.

Для преодоления перечисленных ранее трудностей предложены следующие принципы разработки ПО для развития ИЭС:

- Решение комплекса задач необходимо выполнять в рамках единого программного инструмента, который обеспечит единое информационное пространство для всего комплекса решаемых задач по развитию ИЭС.
- Реализация ПО должна основываться на современных информационных технологиях и подходах к программированию.
- ПО должно быть построено на базе парадигмы компонентного программирования, что обеспечит возможность представления методов, алгоритмов и моделей в виде элементов программного фонда, пригодных для многократного использования.
- Программные компоненты должны обладать стандартизированными в рамках единого программного инструмента программными интерфейсами с описанием подпрограмм, форматов входных и выходных данных.
- При разработке ПО использовать в его составе в качестве программных компонентов только свободно распространяемое ПО.
- Моделирование ИЭС на основе мультиагентного подхода [12-14] и цифровых технологий, что позволит представить такую технологически сложную систему в виде совокупности агентов, обладающих своим индивидуальным поведением и взаимодействующих друг с другом для поиска решений.

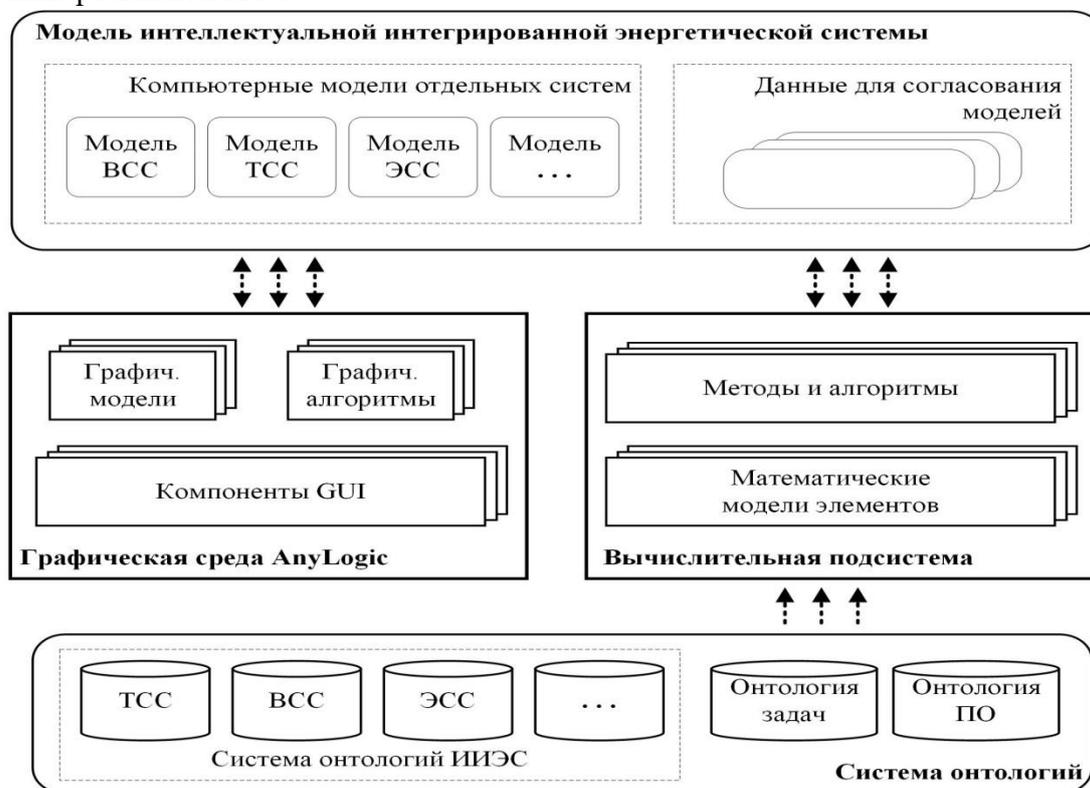
Предложенная архитектура программной платформы для развития ИЭС включает следующие составляющие (см. рис. 1):

1. *Графическая среда AnyLogic*. Предназначена для работы с графическими изображениями схем ИЭС и данными по элементам их схем на плане местности. Эта система отвечает за работу пользователя системы с активной моделью ИЭС, и позволяет ему просматривать данные в удобном для восприятия виде и вносить необходимые изменения. Графическая подсистема состоит из программных компонентов, реализующих взаимодействие пользователя с системой и компонентов-моделей, реализующих графические модели элементов ИЭС [3-4].

2. *Вычислительная подсистема*. Эта подсистема предназначена для решения расчетно-аналитических задач и состоит из библиотеки программных компонентов. Библиотека программных компонентов включает следующие составляющие: универсальные программные компоненты, реализующие методы и алгоритмы решения прикладных задач; программные компоненты, реализующие модели элементов ИЭС.

Системы энергоснабжения определенного типа обладают характерными для этого типа свойствами, составом прикладных задач и используемым для их решения специализированным ПО. Знания о них необходимо сохранить в форме, пригодной для обработки программными системами, и использовать при решении различных задач развития. Для этого необходимо организовать хранение этих знаний в виде онтологий [15-17].

В процессе автоматического построения программной системы используются онтологии, которые позволяют формализовано описать объекты предметной области, их свойства и взаимосвязи между этими объектами. Онтологии используются для решения следующих задач: автоматическая интеграция программных компонентов в программную среду AnyLogic; автоматизированное построение программной системы для решения задачи управления развитием ИЭС; применение программной платформы при решении задач управления развитием ИЭС.



**Рис. 1.** Архитектура программной платформы для управления развитием интегрированных энергетических систем: ВСС – водоснабжающая система; ТСС – теплоснабжающая система; ЭСС – электроснабжающая система

**Онтологии ИЭС.** Построение программной системы для работы с конкретной ИЭС осуществляется в автоматизированном режиме на основе знаний о системах энергоснабжения, входящих в состав моделируемой ИЭС, из соответствующей онтологии ИЭС. Онтологии ИЭС включают описания элементов систем энергоснабжения и свойств этих элементов.

**Онтология задач.** Знания о задачах используются для настройки компьютерной модели ИЭС на конкретную прикладную задачу и автоматизации процесса подготовки данных для вызова необходимых программных компонентов. Хранение этих знаний организовано в онтологии задач, которая содержит описание прикладных задач и методов их решения, описание алгоритмов, перечисление параметров, являющихся исходными данными и параметров, получаемых в результате решения задачи.

**Онтология ПО.** Онтология ПО предназначена для хранения знаний, необходимых для автоматизации построения и использования ПО. Эта онтология содержит описание:

- программных компонентов, используемых для построения программной системы;
- метаданных (входные и выходные параметры, описание форматов данных);
- технологий и интерфейсов доступа к программным компонентам.

Определены основные технологии для построения платформы, которые включают: объектно-ориентированное программирование, компонентное программирование, метапрограммирование, технологии реляционных баз данных, классические алгоритмы

компьютерной графики, инженерии знаний, ГИС-технологии, теорию графов, программную инженерию, технологии интеграции разноразличных программ. Программная среда AnyLogic используется в качестве инструмента, организующего графический интерфейс для работы с моделью ИЭС и проведение моделирования на основе мультиагентного подхода [5-7].

Предложен оригинальный подход к построению интерфейсов программных компонентов, заключающийся в стандартизации их интерфейсов за счет применения паттернов проектирования. Компоненты платформы, в зависимости от выполняемых функций, разделены на группы. Для каждой группы компонентов разработаны интерфейсы взаимодействия между компонентами, включая правила их вызова, передачи параметров и результатов расчетов. Выделены следующие группы компонентов:

- вычислительные компоненты, содержащие программные реализации алгоритмов для математического моделирования и оптимизации ИЭС;
- системные компоненты, которые обеспечивают подготовку и экспертизу данных;
- управляющие компоненты, предназначенные для организации последовательности вызовов вычислительных и системных компонентов.

**2. Моделирование ИЭС на базе программной платформы.** В соответствии с предложенным методическим подходом разработан прототип программной платформы для решения задач развития ИЭС. На базе этой платформы выполнено моделирование ИЭС. В программной среде AnyLogic сформирована мультиагентная модель ИЭС. Мультиагентный подход является актуальным инструментом для моделирования и исследования ИЭС, данный подход успешно используется учеными во всем мире для решения задач различной сложности и размерности [18-20]. Мультиагентный подход находит широкое применение в таких областях, как распределенное решение сложных задач, совмещенное проектирование изделий, реинжиниринг бизнеса, построение виртуальных предприятий, имитационное моделирование интегрированных производственных систем и электронная торговля. Мультиагентные технологии направлены на получение решения в результате взаимодействия множества самостоятельных целенаправленно действующих агентов. Углубленная структура мультиагентной системы, разработанная для исследования взаимодействия объектов при решении задачи развития ИЭС представлена на рис. 2. Решение задачи развития моделируемой ИЭС выполняется с использованием программных компонентов вычислительной подсистемы. Интеграция этих программных компонентов в рамках единого вычислительного процесса выполняется динамически на основе знаний из онтологий.

Все объекты в рассматриваемой ИЭС можно разделить на три группы: потребители, сети и источники энергии. Каждый объект представлен своим агентом, отражающим его поведение в системе, связи с другими агентами, характеристики, параметры и индивидуальные ограничения. Иерархия взаимодействия агентов описывается тремя уровнями. На первом уровне – уровне развития – находится агент развития и его вспомогательные локальные агенты: агент развития источников энергии; агент развития сетей; агент формирования схемы.

Агенты уровня развития осуществляют подготовку данных для расчета схемы, производят формирование избыточной схемы ИЭС и отправляют необходимые данные на уровень расчета, затем производят анализ полученных данных по найденному решению и формируют решение по развитию ИЭС, также они выводят статистику пользователям в виде графиков и диаграмм.

Второй и третий уровни функционирования объектов объединены в уровне расчета. На втором уровне находятся координирующие агенты: сетевой агент централизованной системы и сетевые агенты распределенных подсистем. Сетевой агент централизованной системы осуществляет координацию и надзор за формированием решения для объектов централизованной генерации. Он обменивается информацией с агентом развития и сетевыми

агентами распределенных подсистем. Координацию и контроль источников распределенной генерации, которые находятся у активных потребителей, осуществляют сетевые агенты распределенных подсистем. Они, в свою очередь, обмениваются данными по сформированному решению с агентом развития и сетевым агентом централизованной системы. При необходимости сетевой агент централизованной системы и сетевые агенты распределенных подсистем осуществляют корректировку полученных решений.

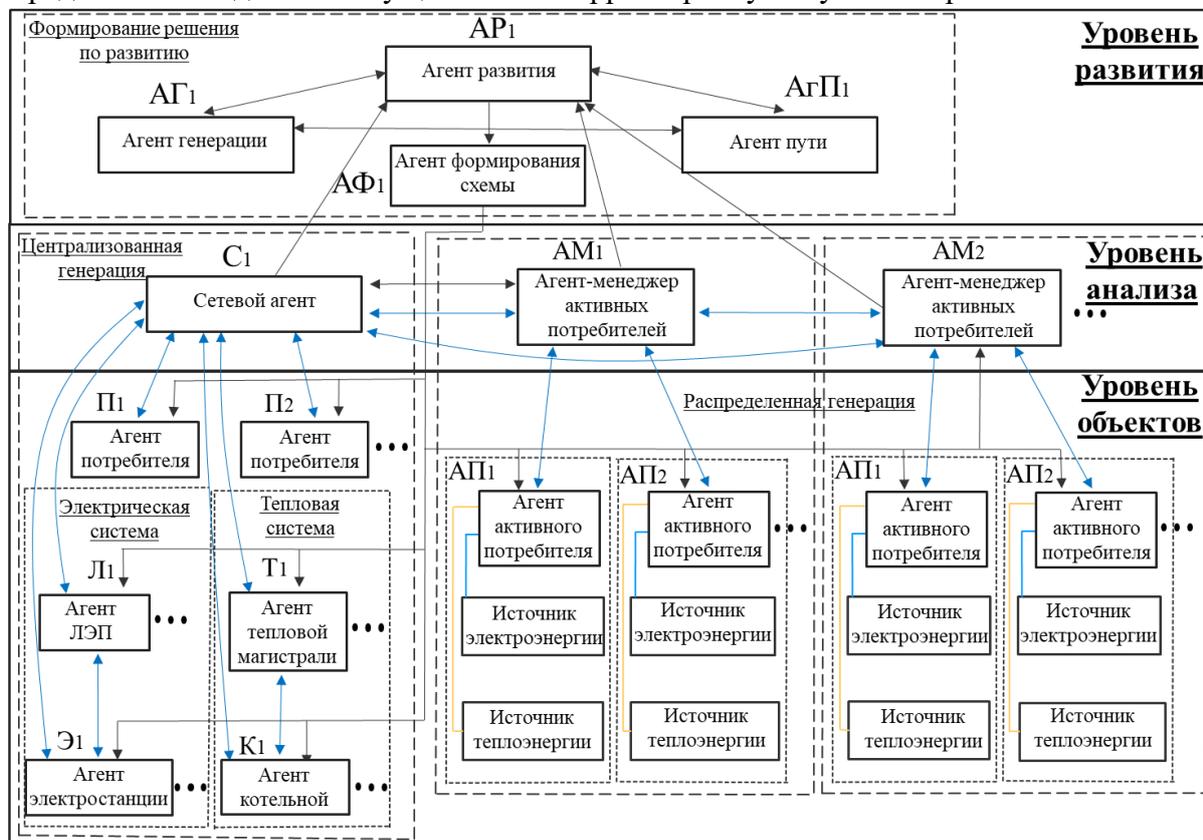


Рис. 2. Структура мультиагентной системы при решении задачи развития

На третьем уровне находятся агенты потребителей, агенты участков сети, агенты централизованной генерации и агенты активных потребителей, они осуществляют функционирование объектов ИЭС и участвуют в формировании решения по своим подсистемам, обмениваясь данными со связанными с ними агентами.

**3. Апробация программной платформы при решении задачи развития интегрированной энергетической системы.** Для апробации программной платформы при решении задачи развития ИЭС разработана тестовая схема, представленная на рис. 3. Эта схема позволяет наглядно представить поведение агентов и взаимодействие между ними при решении задачи развития 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 chillерных установок для выработки хладотеплоты; 29 линий электропередач; 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. Централизованные источники энергии имеют зоны эффективной работы генерирующего оборудования. Электрические бойлеры и установки с

солнечными панелями расположены у активных потребителей, чиллерные установки располагаются как у активных потребителей, так и у обычных потребителей.

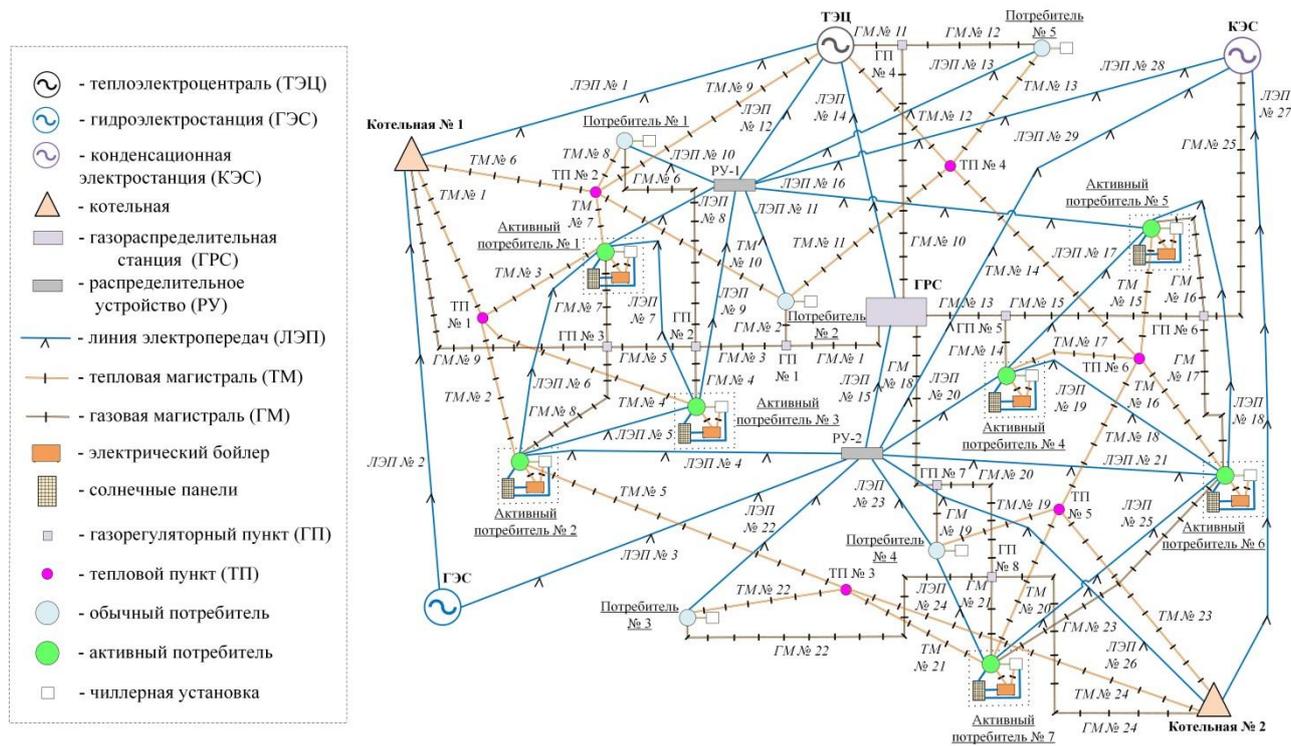


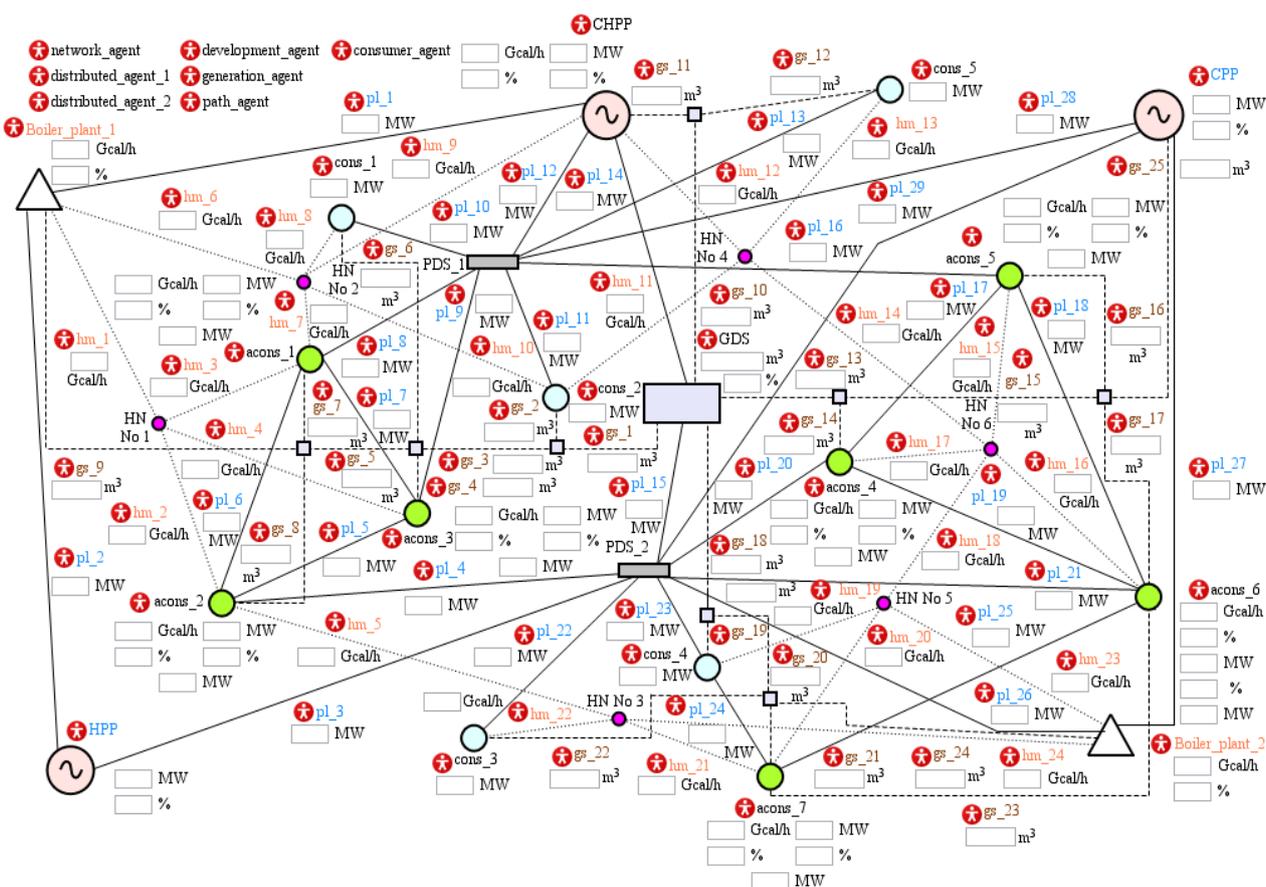
Рис. 3. Тестовая схема интегрированной энергетической системы

С помощью этой схемы выполнена проверка разработанных алгоритмов взаимодействия объектов в ИЭС и проведен анализ полученных данных. В результате проведенного расчета на данной схеме выбрана наиболее оптимальная конфигурация ИЭС, отражающая интересы, предпочтения и возможности активных потребителей и всей ИЭС, с учетом системных условий и ограничений.

Разработана мультиагентная модель ИЭС (рис. 4) в соответствии со структурой, представленной на рис. 2. В этой модели представлены элементы тепловой, электрической, газовой и системы хладоснабжения в виде агентов и выполнено описание взаимодействия этих агентов между собой. Каждый элемент схемы представлен своим агентом, агенты в модели выделены красным цветом (см. рис. 4). Описание логики и поведения агентов в разработанной мультиагентной модели осуществляется через диаграммы состояний. Если у агента можно выделить несколько состояний или поведений, выполняющих различные действия при наступлении каких-то событий, то поведение такого объекта может быть описано в терминах диаграммы состояний. Диаграммы состояний содержат информацию о различных состояниях, в которых может существовать объект и о том, как он переходит из одного состояния в другое. Переходы из одного состояния в другое могут сработать в результате заданного в качестве условия появления события: истечение заданного времени, получение сообщения, выполнение заданного логического условия и т.д. [21-22].

С использованием разработанной мультиагентной модели выполнен вычислительный эксперимент по развитию ИЭС. В результате взаимодействия агентов и подключенных программных компонентов в мультиагентной модели было найдено оптимальное решение, в соответствии с которым сформированы и реализованы необходимые меры по строительству сетевого и генерирующего оборудования. Наглядное представление полученного решения отображено на рис. 5, задействованные в энергоснабжении участки сетей выделены соответствующим цветом. В рамках заданных капиталовложений осуществлен выбор

наиболее экономичных и экологически чистых источников энергии с учетом зон эффективной работы оборудования.



**Рис. 4.** Мультиагентная модель интегрированной энергетической системы в программной среде AnyLogic

Таким образом, на полученной схеме можно увидеть, что для выработки электрической энергии использовалась ГЭС, загруженная на 100% и ТЭЦ в централизованной системе, также значительное количество электрической энергии взято от солнечных панелей, установленных у активных потребителей, поскольку в соответствии с заданными условиями такая энергия является наиболее экономичной и экологически чистой. В качестве резерва для регулирования доли энергии в ночное время, когда солнечные панели не смогут производить электрическую энергию, планируется использовать мощность генерирующего оборудования ТЭЦ, электрический резерв которых составляет 400 МВт, совместно с маневренными гидрогенераторами ГЭС. Для передачи необходимого количества электрической энергии потребителям построены соответствующие ЛЭП, выбранные из возможных вариантов, также в качестве магистральных сетей построены ЛЭП № 16 и № 4, в данном расчете они не задействованы для передачи электрической энергии, но при перераспределении энергии между централизованными и распределенными источниками будут необходимы. КЭС не была задействована для производства электрической энергии, поскольку ее строительство и строительство протяженных ЛЭП, подходящих к ней, выходит за рамки заданных капиталовложений.

Для выработки тепловой энергии использовались централизованные котельные № 1 и № 2, а также ТЭЦ, распределенные источники тепловой энергии в виде электрических бойлеров были задействованы у нескольких активных потребителей, поскольку с точки зрения экономичности, они являются довольно дорогими при эксплуатации. В качестве резерва тепловой энергии выступают котельные № 1 и № 2, суммарный резерв которых составляет 500

Гкал/ч. Также были выбраны наиболее оптимальные трубопроводы для доставки тепловой энергии потребителям из представленного перечня, в качестве связующих магистральных сетей между подсистемами выступают тепловые магистрали № 5 и № 14. Для выработки хладотеплоты у потребителей были установлены чиллерные установки. Основными потребителями газа являются котельные и ТЭЦ, поэтому к ним были проложены основные газопроводы от газораспределительной станции с ответвлениями к потребителям.

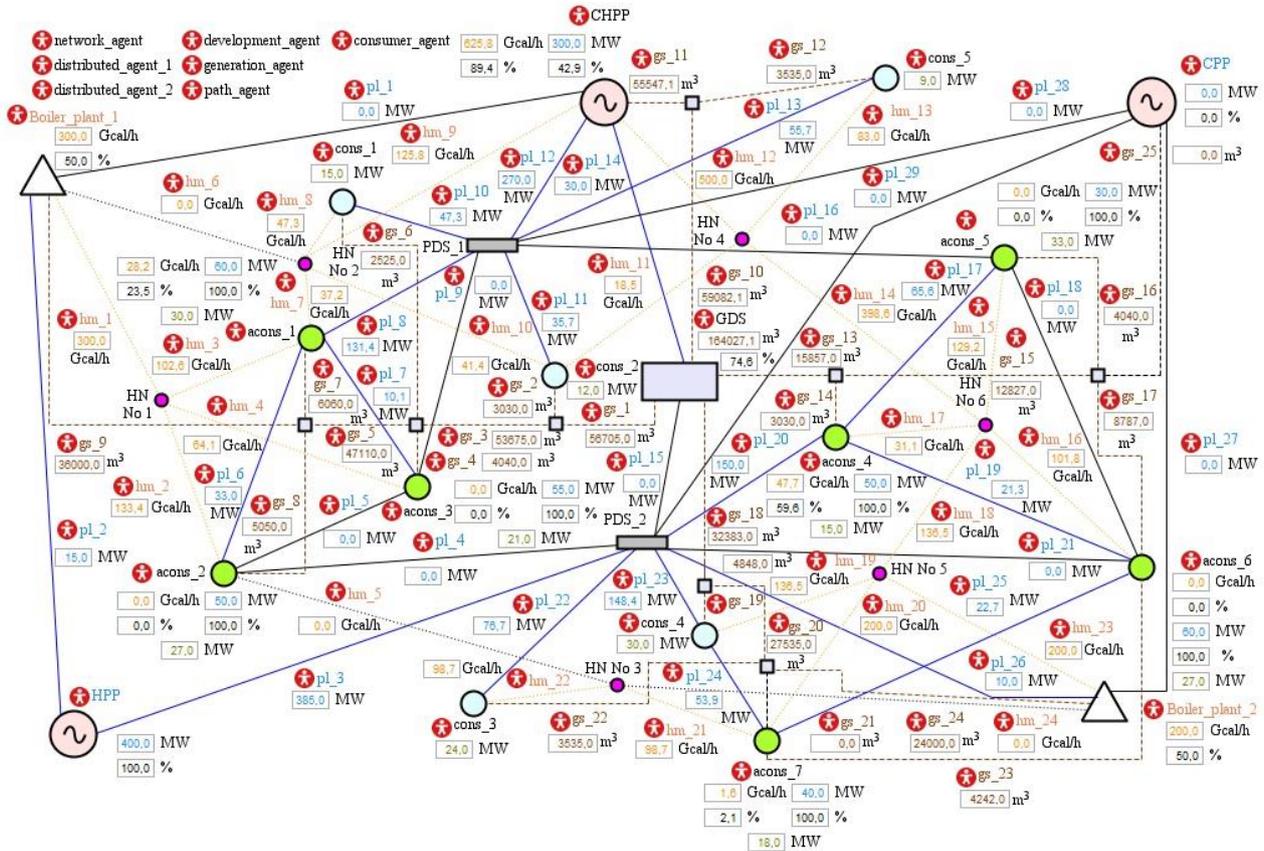


Рис. 5. Результаты расчета интегрированной энергетической системы

Для выработки тепловой энергии использовались централизованные котельные № 1 и № 2, а также ТЭЦ, распределенные источники тепловой энергии в виде электрических бойлеров были задействованы у нескольких активных потребителей, поскольку с точки зрения экономичности, они являются довольно дорогими при эксплуатации. В качестве резерва тепловой энергии выступают котельные № 1 и № 2, суммарный резерв которых составляет 500 Гкал/ч. Также были выбраны наиболее оптимальные трубопроводы для доставки тепловой энергии потребителям из представленного перечня, в качестве связующих магистральных сетей между подсистемами выступают тепловые магистрали № 5 и № 14. Для выработки хладотеплоты у потребителей были установлены чиллерные установки. Основными потребителями газа являются котельные и ТЭЦ, поэтому к ним были проложены основные газопроводы от газораспределительной станции с ответвлениями к потребителям.

Проведенный вычислительный эксперимент показал возможность применения программной платформы для решения задачи развития ИЭС. В результате выполненного эксперимента на разработанной мультиагентной модели удалось сформировать оптимальную схему ИЭС для энергоснабжения потребителей с учетом системных условий и ограничений. Дальнейшее развитие данного направления позволит эффективно решать задачи развития ИЭС.

**Заключение.** Развитие ИЭС представляет собой сложную задачу, требующую применения сложных математических моделей и алгоритмов, учета характеристик различных

типов энергетических систем и согласования условий их совместного функционирования. Для комплексного решения этой задачи в статье предложен методический подход для создания единой программной платформы. Переход к новым методикам решения задач, базирующимся на использовании универсальной единой программной платформы, позволяет в рамках единого информационного пространства объединить различные математические, информационные и интеллектуальные составляющие для решения комплекса задач развития ИЭС. В рамках разработанного методического подхода к построению программной платформы получены следующие наиболее важные результаты: принципы построения платформы; архитектура платформы; технологии и инструментальные средства разработки для реализации платформы; базовая структура библиотеки программных компонентов, их интерфейсы и механизмы интеграции в платформу. Приведено описание структуры мультиагентной модели ИЭС. Продемонстрировано решение задачи развития на примере условной схемы ИЭС. Практическое применение разработанной программной платформы позволяет повысить качество получаемых проектных решений и снизить затраты на проектирование и эксплуатацию ИЭС.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0002) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-38-90266.

#### Список источников

1. Voropai N.I. Integrated Energy Systems: Challenges, Trends, Philosophy. Studies on Russian Economic Development, 2017, vol. 28, no. 5, pp. 492-499, DOI: 10.1134/S107570071705015X.
2. Voropai N.I. Methodological principles of constructing the integrated energy supply systems and their technological architecture. Journal of Physics: Conference Series, 2018, vol. 1111, no. 1, 012001, DOI: 10.1088/1742-6596/1111/1/012001.
3. Ershov A.P. Programming Programme for the BESM Computer. London: Pergamon Press, 1959, 158 p.
4. Smith B.C. Procedural reflection in programming languages PhD Thesis . Brian Cantwell Smit; Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, 1982.
5. Booch G. Object-Oriented Analysis and Design with Applications. Boston: Addison-Wesley, 2007, 691 p.
6. Jacobson I. The Unified Software Development Process. Addison-Wesley, 1999, 493 p.
7. Beck K. Extreme Programming Explained: Embrace Change. Boston: Addison-Wesley, 1999, 137 p.
8. Martin R.C. Agile Software Development: Principles. Patterns and Practices. New York: Pearson Education, 2002, 557 p.
9. Fowler M., Rice D., Foemmel M. Patterns of Enterprise Application Architecture. Addison-Wesley, 2002, 560 p.
10. Silva A.R. Model-driven engineering: a survey supported by the unified conceptual model. Computer Languages Systems & Structures, 2015, vol. 43, pp. 139-155, DOI: 10.1016/j.cl.2015.06.001.
11. Al-Azzoni I., Blank J., Petrović N. A model-driven approach for solving the software component allocation problem. Algorithms, 2021, vol. 354, no. 14, DOI: 10.3390/a14120354.
12. Ren Y., Fan D., Feng Q. Agent-based restoration approach for reliability with load balancing on smart grids Applied Energy, 2019, vol. 249, pp. 46-57, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.119.
13. Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G. 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.
14. Zhang Z., Jing R., Lin J. Combining agent-based residential demand modeling with design optimization for integrated energy systems planning and operation. Applied Energy, 2020, vol. 263, 114623, DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114623.
15. Gruber T.R. A translation approach to portable ontology specifications. Knowledge Acquisition, 1993, vol. 5, no. 2, pp. 199-220.
16. Staab S., Studer R. Handbook on Ontologies. Heidelberg: Springer-Verlag, 2009, 811 p.
17. Staab S., Jing R., Lin J. Model driven engineering with ontology technologies. Reasoning Web. Semantic Tech. for Soft. Engin. Lect. Notes Comput. Sci, 2010, pp. 62-98, DOI: 10.1007/978-3-642-15543-7\_3.
18. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent Agents: Theory and Practice. The Knowledge Engineering Review, 1995, vol. 10, no. 2, pp. 115-152.

19. Fisher K., Muller J.P., Heimig I. Intelligent Agents in Virtual Enterprises. In Proceedings of the First International Conference "The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology". London. UK, 1996, pp. 205-224.
20. Городецкий В.И. Промышленные применения многоагентных систем: прогнозы и реалии / В.И. Городецкий, П.О. Скобелев, О.Л. Бухвалов и др // Труды XVIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: ООО «Офорт». – 2016. – С. 137-162.
21. Абрамов В.И. Применение социального моделирования с использованием агент-ориентированного подхода в приложении к научно-техническому развитию, реализации НИОКР и поддержанию инновационного потенциала / В.И. Абрамов, А.Н. Кудинов, Д.С. Евдокимов // Вестник ВГУИТ. – 2019. – Т. 81. – № 3. – С. 339-357. – DOI: 10.20914/2310-1202-2019-3-339-359.
22. Маковеев В.Н. Применение агент-ориентированных моделей в анализе и прогнозировании социально-экономического развития территорий / В.Н. Маковеев // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2016. – № 5. – С. 272-289. – DOI: 10.15838/esc.2016.5.47.15.

**Стенников Валерий Алексеевич.** Доктор технических наук, профессор, академик РАН, директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, AuthorID: 442880; SPIN: 7059-4182; ORCID: 0000-0001-6219-0354, sva@isem.irk.ru, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия.

**Барактенко Евгений Алексеевич.** Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, AuthorID: 670523; SPIN: 4965-6984; ORCID: 0000-0002-6934-0025, barakhtenko@isem.irk.ru, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия.

**Соколов Дмитрий Витальевич.** Кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, AuthorID: 710020; SPIN: 7029-0680; ORCID: 0000-0002-4068-7770, sokolov\_dv@isem.irk.ru, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия.

**Майоров Глеб Сергеевич.** Аспирант Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, AuthorID: 1001072; SPIN: 9413-6623; ORCID: 0000-0002-7405-1965, mayorovgs@isem.irk.ru, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия.

---

UDC 621.311.001.57

DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.002

## Methodical approach to building a software platform for the development of integrated energy systems

**Valery A. Stennikov, Evgeny A. Barakhtenko, Dmitry V. Sokolov, Gleb S. Mayorov**

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,

Russia, Irkutsk, mayorovgs@isem.irk.ru

**Abstract.** Currently, the direction associated with the study of integrated energy systems is actively developing. This direction considers various types of systems (electricity, heat, cold, gas supply, etc.) as subsystems of a single system and allows you to get advantages over traditional approaches to the study of energy systems, in which these systems are considered independently of each other. The article proposes a methodical approach to organizing a single information space for solving the problems of developing integrated energy systems in the form of a single software platform. This approach includes the following components: platform building principles; platform architecture; technologies and development tools for platform implementation; the basic structure of the library of software components, their interfaces and integration mechanisms into the platform. In the process of building a software system, it is proposed to use ontologies that are used to solve the following problems: automatic integration of software components into the AnyLogic software environment; automated construction of a software system for solving the problem of managing the development of integrated energy systems; application of the software platform in solving practical problems. In accordance with the proposed methodological approach, a software platform prototype has been implemented. The solution of the problem of development is demonstrated on the example of the scheme of an integrated energy system. The results of a computational experiment on a test circuit of an integrated energy system, which was carried out using the developed software prototype, are presented. As a result of the experiment performed on the developed multi-agent model, it was possible to form the optimal scheme of an integrated energy system for power supply to consumers, taking into account system conditions and limitations.

**Keywords:** integrated energy systems, multi-agent approach, software platform, ontologies, modeling

**Acknowledgements:** The research was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0002) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030 and funded by RFBR, project number 20-38-90266.

## References

1. Voropai N.I., Stennikov V.A., Barakhtenko E.A. Integrated Energy Systems: Challenges, Trends, Philosophy. Studies on Russian Economic Development, 2017, vol. 28, no. 5, pp. 492-499, DOI: 10.1134/S107570071705015X.
2. Voropai N.I., Stennikov V.A., Barakhtenko E.A. Methodological principles of constructing the integrated energy supply systems and their technological architecture. Journal of Physics: Conference Series, 2018, vol. 1111, no. 1, 012001, DOI: 10.1088/1742-6596/1111/1/012001.
3. Ershov A.P. Programming Programme for the BESM Computer. London: Pergamon Press, 1959, 158 p.
4. Smith B.C. Procedural reflection in programming languages PhD Thesis. Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, 1982.
5. Booch G. Object-Oriented Analysis and Design with Applications. Boston: Addison-Wesley, 2007, 691 p.
6. Jacobson I., Booch G., Rumbaugh J. The Unified Software Development Process. Addison-Wesley, 1999, 493 p.
7. Beck K. Extreme Programming Explained: Embrace Change. Boston: Addison-Wesley, 1999, 137 p.
8. Martin R.C. Agile Software Development: Principles, Patterns and Practices. New York: Pearson Education, 2002, 557 p.
9. Fowler M., Rice D., Foemmel M. et al. Patterns of Enterprise Application Architecture. Addison-Wesley, 2002, 560 p.
10. Silva A.R. Model-driven engineering: a survey supported by the unified conceptual model. Computer Languages Systems & Structures, 2015, vol. 43, pp. 139-155, DOI: 10.1016/j.cl.2015.06.001.
11. Al-Azzoni I., Blank J., Petrović N. A model-driven approach for solving the software component allocation problem. Algorithms, 2021, vol. 354, no. 14, DOI: 10.3390/a14120354.
12. Ren Y., Fan D., Feng Q. et al. Agent-based restoration approach for reliability with load balancing on smart grids. Applied Energy, 2019, vol. 249, pp. 46-57, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.119.
13. Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G. et al. 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.
14. Zhang Z., Jing R., Lin J. Combining agent-based residential demand modeling with design optimization for integrated energy systems planning and operation. Applied Energy, 2020, vol. 263, 114623, DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114623.
15. Gruber T.R. A translation approach to portable ontology specifications. Knowledge Acquisition, 1993, vol. 5, no. 2, pp. 199-220.
16. Staab S., Studer R. Handbook on Ontologies. 2nd edn. Heidelberg: Springer-Verlag, 2009, 811 p.
17. Staab S., Walter T., Gröner G. et al. Model driven engineering with ontology technologies. Reasoning Web. Semantic Tech. for Soft. Engin. Lect. Notes Comput. Sci, 2010, pp. 62-98, DOI: 10.1007/978-3-642-15543-7\_3.
18. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent Agents: Theory and Practice. The Knowledge Engineering Review, 1995, vol. 10, no. 2, pp. 115-152.
19. Fisher K., Muller J.P., Heimig I. et al. Intelligent Agents in Virtual Enterprises. In Proceedings of the First International Conference "The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology". London. UK, 1996, pp. 205-224.
20. Gorodetskij V.I., Skobelev P.O., Buxvalov O.L. et al. Promyshlennyye primeneniya mnogoagentnyh sistem: prognozy i realii [Industrial applications of multi-agent systems: forecasts and realities]. Trudy XVIII Mezhdunarodnoy konferentsii «Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh si-stemakh». Samara: OOO «Ofort» [Proc. of the XVIII Int. Conf. "Problems of control and modeling in complex systems". Samara: OOO «Ofort»], 2016, pp. 137-162. (In Russia)
21. Abramov V., Kudinov A., Evdokimov D. Primenenie social'nogo modelirovaniya s ispol'zovaniem agent-orientirovannogo podhoda v prilozhenii k nauchno-tehnicheskomu razvitiyu, reali-zacii NIOKR i podderzhaniju innovacionnogo potenciala [Application of social modeling using agent based approach in scientific and technical development, implementation of R&D and maintenance of innovative potential]. Izvestiya Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy [Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2019, vol. 81, no. 3, pp 339-359, DOI: 10.20914/2310-1202-2019-3-339-359. (In Russia)
22. Makoveev V. Primenenie agent-orientirovannykh modelej v analize i prognozirovanii social'no-jekonomicheskogo razvitiya territorij [Using agent-based models in the analysis and forecast of socio-economic development of

territories]. *Ekonomicheskiye i sotsial'nyye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz* [Economic and social changes facts trends forecast], 2016, no. 5, pp. 272-289, DOI: 10.15838/esc.2016.5.47.15. (In Russia)

**Valery A. Stennikov.** *Doctor of technical sciences, professor, academician of RAS, director Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, AuthorID: 442880; SPIN: 7059-4182; ORCID: 0000-0001-6219-0354, sva@isem.irk.ru, 664033, Russia, Irkutsk, Lermontov St., 130.*

**Evgeny A. Barakhtenko.** *Candidate of technical sciences, associate professor, senior researcher Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, AuthorID: 670523; SPIN: 4965-6984; ORCID: 0000-0002-6934-0025, barakhtenko@isem.irk.ru, 664033, Russia, Irkutsk, Lermontov St., 130.*

**Dmitry V. Sokolov.** *Candidate of technical sciences, senior researcher Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, AuthorID: 710020; SPIN: 7029-0680; ORCID: 0000-0002-4068-7770, sokolov\_dv@isem.irk.ru, 664033, Russia, Irkutsk, Lermontov St., 130.*

**Gleb S. Mayorov.** *Postgraduate student Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, AuthorID: 1001072; SPIN: 9413-6623; ORCID: 0000-0002-7405-1965, mayorovgs@isem.irk.ru, 664033, Russia, Irkutsk, Lermontov St., 130.*

*Статья поступила в редакцию 29.08.2022; одобрена после рецензирования 12.09.2022; принята к публикации 19.09.2022.*

*The article was submitted 08/29/2022; approved after reviewing 09/12/2022; accepted for publication 09/19/2022.*