
УДК 004.942

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ЕЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

© 2024 г. В. А. Стенников, Е. А. Барахтенко*, Д. В. Соколов, Г. С. Майоров

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем
энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук,
Иркутск, Россия*

**e-mail: barakhtenko@isem.irk.ru*

Поступила в редакцию 21.11.2023 г.

После доработки 17.06.2024 г.

Принята к публикации 22.06.2024 г.

Построение интегрированных энергетических систем (ИЭС) на базе традиционных работающих раздельно энергосистем обеспечивает повышение эффективности и надежности энергоснабжения потребителей. При этом ИЭС являются сложными для проектирования системами. Цифровой двойник является инструментом, позволяющим объединить все необходимые для проектирования ИЭС средства в едином информационном пространстве. Программные средства, реализующие цифровой двойник ИЭС, требуют высокой вычислительной гибкости, что обусловлено необходимостью моделирования разнообразного оборудования и привлечения широкого спектра методов и математических моделей. Автоматизация процесса построения вычислительной подсистемы цифрового двойника является высокоэффективным решением для преодоления перечисленных выше проблем. В настоящей статье предлагается методический подход к автоматизации построения вычислительной подсистемы цифрового двойника ИЭС. Этот подход предполагает использование современных средств метапрограммирования в рамках единой программной платформы для выполнения автоматизированного построения. В процессе построения реализуется методология Model-Driven Engineering и используются знания о предметной области, формализованные в виде онтологий. Цифровой двойник, полученный в результате практического применения предложенного методического подхода, позволяет проводить компьютерное и математическое моделирование ИЭС в виртуальном пространстве с исследованием различных конфигураций их построения.

Ключевые слова: интегрированная энергетическая система, онтология, автоматизация вычислений, автоматизация программирования, Model-Driven Engineering, цифровой двойник

DOI: 10.31857/S0002331024020015

ВВЕДЕНИЕ

Современные города и промышленные центры обладают развитой энергетической инфраструктурой, включающей системы топливо-, электро-, тепло- и хладо-снабжения. Эти системы имеют большое социальное и экономическое значение. Создание новой технологической структуры в виде интегрированной энергетической системы (ИЭС) на базе нескольких отдельно функционирующих энергосистем позволяет существенно расширить их функциональные возможности, обеспечить взаимозаменяемость энергоносителей, реализовать синергетический эффект, обеспечив надежность, безопасность, экономичность энергоснабжения, а также снижение негативного воздействия на окружающую среду.

ИЭС – это сложные технические системы с разветвленными сетями и сложной структурной конфигурацией. Они включают в себя многочисленные энергетические системы, каждая из которых содержит подсистемы, выполняющие свои функции (выработка, транспортировка, распределение и потребление энергии). Каждая из этих подсистем состоит из элементов со своими наборами оборудования.

Проектирование ИЭС является довольно сложной задачей из-за их сложной конфигурации, широкого спектра применяемого оборудования и разнообразного набора математических моделей, используемых для его моделирования. Проектирование ИЭС часто включает в себя моделирование всех подсистем, наборов их элементов и оборудования с учетом технических и технологических решений для интеграции систем различных типов. Решить проблему проектирования ИЭС невозможно без специализированного программного обеспечения, которое создает условия для повышения эффективности проектирования, качества проектных решений и автоматизации трудоемких вычислительных операций.

Обеспечение высокого качества программного инструментария для проектирования ИЭС предполагает объединение методического, математического и программного обеспечения в рамках единого информационного пространства, где реализуются информационные связи с проектируемым объектом. В настоящее время инструмент с указанными характеристиками соответствует концепции цифрового двойника (ЦД).

Для эффективного внедрения цифрового двойника в процесс проектирования важно обеспечить высокий уровень гибкости при его построении. Это объясняется главным образом тем, что он позволяет точно моделировать разнообразное оборудование. Также важно адаптировать используемые методы и алгоритмы к конкретной задаче в контексте ее решения. Подходы, направленные на автоматизацию построения цифрового двойника ИЭС, позволяют преодолеть описанные трудности.

В статье предлагается оригинальный методический подход к автоматизации вычислений, основанный на цифровом двойнике ИЭС для решения задач ее проектирования. Приведена структура этого подхода. Предложена методика автоматизированного построения вычислительной подсистемы цифрового двойника и продемонстрировано ее применение на практическом примере.

ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ФОРМУЛИРОВКА ЦЕЛЕЙ ИССЛЕДОВАНИЯ

Математическое моделирование интегрированных энергетических систем, осуществляемое при их проектировании, предполагает решение подзадач, имеющих общие содержательные и математические постановки. Поэтому методы, алгоритмы

и специальное программное обеспечение, используемые для их решения, могут носить универсальный характер. Однако используемые программные средства не обеспечивают универсальности, что обусловлено следующими причинами. Подготовка к проведению вычислений и сам процесс вычислений сталкиваются с трудностями, связанными с использованием целого ряда математических моделей оборудования для элементов ИЭС. Программные реализации методов и алгоритмов не отделены от программных реализаций моделей элементов ИЭС. В результате их адаптация к конкретному набору оборудования при решении практических задач затруднительна, поскольку необходимо изменять программные компоненты для моделируемого оборудования. Поддерживать в актуальном состоянии весь набор необходимых программных компонентов, реализующих математические модели оборудования различных подсистем ИЭС, является непростой задачей.

Использование компонентного подхода для создания цифрового двойника ИЭС обеспечивает универсальные реализации программных компонентов, которые можно повторно использовать при разработке программного обеспечения. Для успешного применения этого подхода крайне важно установить такие принципы реализации программных компонентов, которые обеспечат разделение методов и моделей, а также их адаптируемость и полную интеграцию в единую программную систему. Все это необходимо для эффективного решения прикладных задач проектирования ИЭС.

Процесс проектирования ИЭС предполагает использование широкого спектра методов и алгоритмов, каждый из которых должен быть реализован в виде программного компонента. ИЭС состоят из подсистем, выполняющих различные энергетические функции, каждая из которых образована компонентами стандартного набора оборудования. Для моделирования этого оборудования необходимо разработать программные компоненты, реализующие его модели. В результате формируется набор компонентов, которые необходимо организовать в библиотеки. Также важной задачей является их универсальное описание и разработка методики их автоматизированной интеграции в единую программную систему при решении задач проектирования ИЭС.

Цифровой двойник объединяет весь комплекс методического, математического и программного обеспечения для проектирования ИЭС, их моделирования в виртуальном пространстве и обеспечивает согласование характеристик с реальными ИЭС. Внедрение цифрового двойника ИЭС требует разработки единого методического подхода к автоматизации вычислений. Этот подход должен учитывать описанные выше трудности моделирования этих систем и предоставлять следующие возможности:

- Моделирование интегрированных энергетических систем с входящим в них различными типами энергетических систем и набором оборудования.
- Реализация комплекса задач по проектированию ИЭС на базе единой программной платформы.
- Автоматизация вычислений на базе цифрового двойника ИЭС при решении задачи ее проектирования.
- Разделение программных реализаций методов (алгоритмов) и моделей элементов ИЭС для обеспечения их универсальности и возможности повторного использования.

ОБЗОР НАУЧНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Впервые представленная М. Гривсом [1] концепция цифрового двойника включала в себя три компонента: цифровую (виртуальную) часть, реальный физический продукт и связь между ними. В работе [2] представлен обзор истории развития цифрового двойника, его современных определений и моделей, а также приведены шесть типов ключевых технологий. Ф. Тао и др. в своей работе [3] расширили концепцию цифрового двойника до пяти компонентов, включая данные и сервис. В целом компоненты продукта или жизненного цикла продукта можно рассматривать как цифровые двойники. В работе [4] приведено исследование разницы между технологией управления жизненным циклом продукта (PLM) и цифровым двойником. В этой работе делается вывод, что PLM больше ориентирована на управление компонентами, продуктами и системами компании на протяжении всего их жизненного цикла, тогда как цифровой двойник может представлять собой набор моделей для мониторинга и обработки данных в режиме реального времени. В некоторых случаях может быть целесообразнее разбить продукт или компоненты жизненного цикла продукта на подкомпоненты, создать несколько цифровых двойников и установить связи между ними [5]. Существуют работы, где рассматривается шестиуровневая архитектура взаимодействия, в которой цифровые двойники низкого уровня объединяются в большие цифровые двойники высокого уровня [6].

В статье [7] приведено описание пятимерной модели цифрового двойника, которая, по мнению авторов, обладает хорошей применимостью и масштабируемостью, а также может служить общей моделью для использования цифровых двойников в различных областях. В той же работе предпринята попытка изучить и обобщить широко используемые технологии и инструменты цифровых двойников. В статье отмечается, что из-за различий в форматах, протоколах и стандартах существующие инструменты не могут быть интегрированы и одновременно использованы для решения конкретной прикладной задачи. В исследовании [8] рассматривается проблема стандартизации данных в рамках цифрового двойника и предлагается подход к ее решению.

В работе [9] рассматриваются различные научные и промышленные разработки и выявляются проблемы реализации, с которыми сталкивается технология цифрового двойника. Одним из основных недостатков является различие в определениях и компонентах цифрового двойника. В данной работе авторы приходят к выводу, что развитие технологий машинного обучения и больших данных существенно повлияло на формулировку концепции цифрового двойника.

В настоящее время активно ведутся исследования по разработке методологии создания и использования цифровых двойников. В работе [10] предложен подход к построению ИТ-инфраструктуры для создания интеллектуальных систем управления развитием и эксплуатацией энергетических систем. Этот подход основан на результатах системных исследований энергетики и использует современные концепции, такие как цифровые двойники и цифровые образы. В статье [11] рассматривается современное состояние исследований цифровых двойников, где акцентируется внимание на ключевые компоненты, текущие разработки и применение цифровых двойников в промышленности. Важнейшие требования к цифровым двойникам промышленных энергосистем определены в [12]. Растет число работ, исследующих различные характеристики технологии цифровых двойников применительно к ИЭС. В работе [13] обсуждаются технические основы технологии цифровых двойников

ИЭС и анализируется ее применение. Авторы статьи [14] исследуют подход к использованию технологий цифровых двойников в ИЭС и предлагают инфраструктуру для цифровых двойников на аппаратной основе. В исследовании [15] предложена структура цифрового двойника для решения задач управления ИЭС. В статье также представлен процесс автоматизации генерации модели, обеспечивающий отражение цифровой модели физической системы в виртуальное пространство. В статье [16] исследуется использование технологии цифровых двойников для моделирования региональной интегрированной энергетической системы при реализации концепции “умных городов”. На конкретных примерах показано, что практическое внедрение технологии цифровых двойников обеспечивает получение значительного экономического эффекта. В статье [17] для создания архитектуры цифрового двойника для интегрированной энергетической системы совместно используется цифровое моделирование и технология моделирования в реальном времени.

Некоторые исследователи предлагают использовать семантические сети для создания цифрового двойника [18–20]. Онтологии могут служить основой для разработки цифровых двойников. Некоторые статьи посвящены примерам применения онтологий при реализации цифровых двойников. Например, авторы [21] анализируют проблемы управления данными цифровых двойников и предлагают использовать онтологии для их решения. Предложенный подход обеспечивает гибкость хранения знаний на протяжении всего жизненного цикла цифрового двойника. В работе [22] представлена общая архитектура цифровых двойников промышленных энергосистем, которая обеспечивает гибкость этих систем и оптимальную их работу. Онтологии используются для хранения информации о ресурсах и сервисах. Используется иерархический подход к проектированию, который включает в себя как онтологию верхнего уровня, так и онтологию предметной области. В исследовании [23] онтология рассматривается как представление цифрового двойника в контексте киберфизических систем. В статье [24] рассмотрены предпосылки применения онтологического подхода к построению цифрового двойника с учетом имеющихся результатов в области онтологического проектирования энергетических систем.

С тех пор как крупные организации проявили интерес к технологиям цифрового двойника, развитие этих технологий значительно ускорилось. В результате появились новые подходы и программные инструменты, облегчающие разработку цифровых двойников. Приведем некоторые из них. Корпорация General Electric разрабатывает и внедряет отраслевую технологию цифровых двойников на базе платформы PREDIX [25]. Корпорация Microsoft предложила платформу Azure Digital Twins, которая предоставляет возможность построения цифрового двойника [26]. Платформа Paladin DesignBase [27] обеспечивает создание цифровых двойников, которые позволяют моделировать, проводить сложный анализ и оптимизировать энергетические системы. В статье [28] предложена архитектура для интеллектуального города, которая рассматривается в качестве основы для разработки платформы цифровых двойников.

Внедрение цифровых двойников предполагает использование сложных программных систем, реализация которых требует использования передовых подходов к разработке программного обеспечения. Подобные подходы являются предметом исследований многих специалистов и широко представлены в литературе. Основой для моделирования современного программного обеспечения является объектно-ориентированный подход [29, 30]. В работах [31–34] предлагается методология Model-Driven Engineering (MDE) для автоматизации этапов создания программного

обеспечения. Данная методология представляет собой совокупность подходов к автоматизированному построению сложных программных систем на основе предварительно разработанных моделей [35]. Подход MDE в настоящее время находится в стадии активного развития. Применение методов, основанных на моделях, позволяет успешно разрабатывать сложные программные системы [36–39]. Подходы к автоматизации этапов создания программного обеспечения на основе метапрограммирования описаны в работах [40–42].

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД И ЕГО КОМПОНЕНТЫ

В настоящей статье предлагается методический подход к автоматизации вычислений на основе цифровых двойников для решения разнообразных задач проектирования ИЭС. Предлагаемый подход включает в себя следующие составляющие:

- принципы разработки программной платформы;
- архитектуру программной платформы;
- методику автоматизированного построения вычислительной подсистемы цифровых двойников;
- принципы обеспечения универсальности программных компонентов.

Особенностью предлагаемого подхода к решению задач проектирования ИЭС является использование единого универсального математического обеспечения, разработанного на основе математических моделей, методов и алгоритмов теорий гидравлических и электрических цепей. В рамках предлагаемого подхода математическое обеспечение реализовано в виде библиотек программных компонентов, которые могут быть повторно использованы при построении цифровых двойников различных ИЭС. Это позволяет преодолеть трудности, возникающие при большом разнообразии оборудования ИЭС и многочисленных математических моделей, используемых для его описания. Библиотеки программных компонентов являются частью разработанной в нашем исследовании программной платформы как единой основы для автоматизированного построения цифрового двойника ИЭС.

Разработка данной программной платформы базируется на следующих принципах.

1. Автоматизированное построение цифрового двойника на базе программной платформы в контексте решения задач проектирования ИЭС.
2. Разделение программных реализаций методов (алгоритмов) и моделей элементов ИЭС для обеспечения их универсальности и возможности повторного использования.
3. Стандартизация в рамках платформы интерфейсов программных компонентов, реализующих методы (алгоритмы) и модели элементов ИЭС, и их организация в виде библиотек программных компонентов.
4. Применение методологии MDE и современных технологий метапрограммирования на базе программной платформы для автоматизации построения цифрового двойника.
5. Интеграция методов решения задач и моделей элементов ИЭС осуществляется в контексте решения задачи проектирования ИЭС, и этот процесс контролируется знаниями, организованными в виде онтологии программного обеспечения.

Универсальность программной реализации методов решения задач и моделей компонентов ИЭС обеспечивается отдельной программной реализацией методов решения задач и моделей компонентов ИЭС. Их интеграция осуществляется в контексте решения прикладной задачи (рис. 1). Автоматизированное построение вычислительной подсистемы цифрового двойника, в рамках которой интегрируются методы и модели, осуществляется за счет применения идей методологии MDE. Особенностью реализации этой методологии является то, что построение управляется описанием структурной конфигурации моделируемой ИЭС и универсальным описанием программных компонентов, содержащимся в онтологии программного обеспечения.

Предлагается программная платформа, разработанная на языке программирования Java, для использования в качестве единой основы автоматизированного построения цифрового двойника ИЭС. Архитектура программной платформы представлена на рис. 2. Она включает в себя следующие составляющие:

- 1) графическую подсистему;
- 2) подсистему хранения данных;
- 3) библиотеки программных компонентов;
- 4) онтологию программного обеспечения.

Графическая подсистема обеспечивает создание компьютерной модели ИЭС, в которой отражается структурная конфигурация системы, исходные характеристики ее элементов, технические ограничения и проектные ограничения по построению ИЭС. Графическая подсистема позволяет пользователю просматривать данные в удобном для восприятия виде и вносить необходимые изменения.

Подсистема хранения данных обеспечивает организацию работы с различными базами данных, которые используются для хранения и повторного использования компьютерных моделей ИЭС, исходных данных и результатов расчетов, данных по объектам городской застройки.

Библиотеки программных компонентов инструментальной платформы (в соответствии со своим предназначением) подразделяются на следующие группы.

1. Библиотека компонентов, содержащих реализации математических методов и алгоритмов для решения задач проектирования ИЭС.
2. Библиотека моделей элементов ИЭС, включающая программные компоненты, реализующие модели различного оборудования энергетической системы.

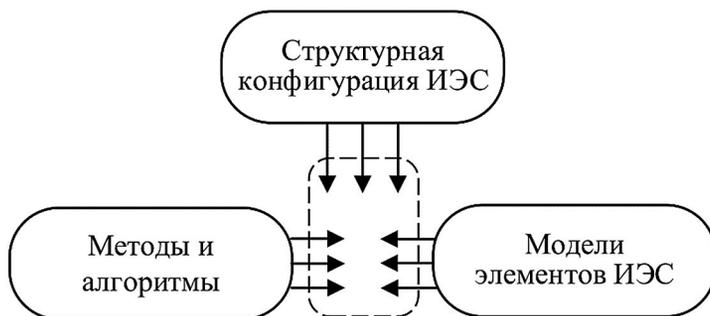


Рис. 1. Иллюстрация принципа построения программной системы.

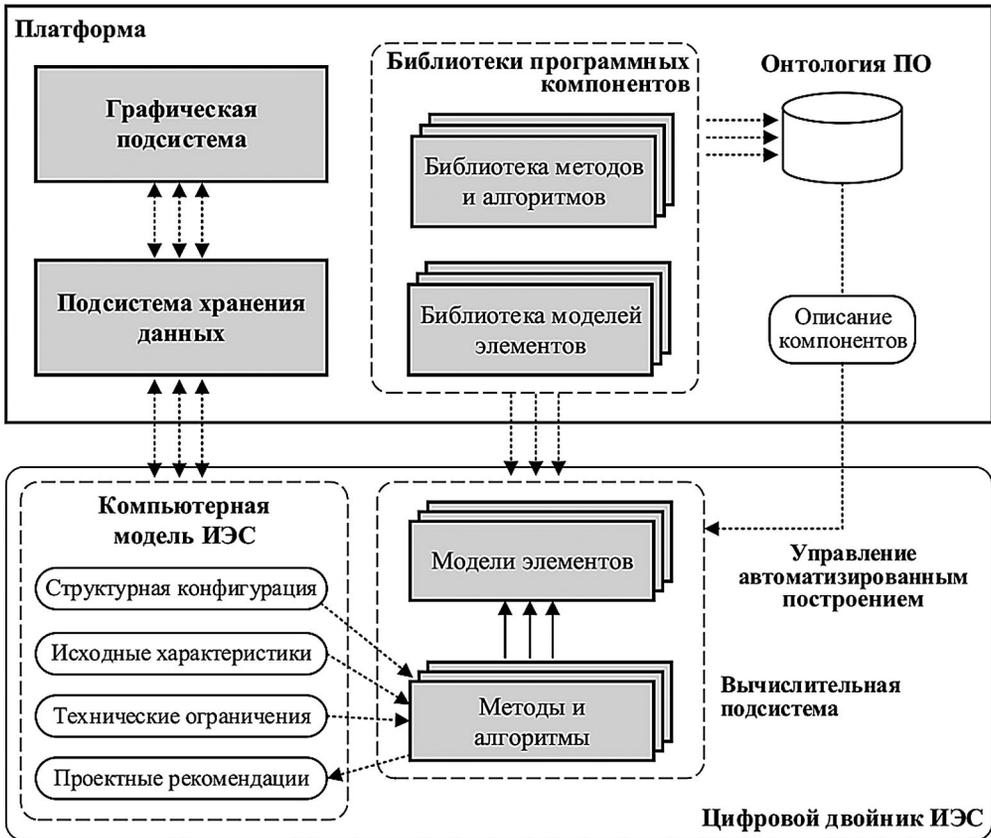


Рис. 2. Архитектура программной платформы.

Онтология программного обеспечения предназначена для хранения знаний, необходимых для автоматизации построения и использования программного обеспечения. Данная онтология содержит описание:

- программных компонентов, реализующих математические методы и алгоритмы решения задач проектирования ИЭС;
- программных компонентов, реализующих модели элементов ИЭС;
- метаданных (входные и выходные параметры, описание форматов данных);
- технологий реализации и интерфейсов доступа к программным компонентам.

Платформа используется для построения цифрового двойника ИЭС в автоматизированном режиме. Цифровой двойник включает в себя (рис. 2):

- компьютерную модель ИЭС;
- программные компоненты, содержащие реализации математических методов и алгоритмов решения задач проектирования ИЭС;
- программные компоненты, реализующие модели элементов ИЭС.

Для обеспечения динамической интеграции программных компонентов были сформулированы принципы, обеспечивающие их универсальность. Эти принципы проиллюстрированы на рис. 3. Для обеспечения унифицированного способа доступа к загружаемым в память программным компонентам, реализующим модели элементов ИЭС, предлагается следующее решение. Каждая модель элемента ИЭС имеет свой уникальный идентификатор. Хранение моделей организовано в хэш-таблице, где идентификатор модели используется в качестве ключа, по которому можно получить ссылку на программный компонент, реализующий соответствующую модель.

Программный компонент, реализующий метод решения конкретной прикладной задачи, включает в себя основной класс на языке Java, который обеспечивает единый стандартизированный доступ к компоненту (рис. 3). При этом возможно использование вспомогательных классов или вычислительных модулей, реализованных на компилируемых языках программирования (C, C++, FORTRAN). В ходе вычислительного процесса программный компонент, реализующий метод решения конкретной прикладной задачи, получает от компьютерной модели сетевую конфигурацию моделируемой системы. При расчете параметров конкретного компонента обращение к его модели осуществляется по ссылке, получаемой из хэш-таблицы по его идентификатору.

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОСТРОЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Для проведения расчетов в первую очередь необходимо разработать компьютерную модель конкретной ИЭС. Эта модель должна отражать свойства системы, включая ее структурную конфигурацию, набор используемого оборудования и его свойства, а также исходные параметры элементов системы. Разработанная модель сохраняется в базе данных для повторного использования. Далее формализуется прикладная задача, уточняется набор оборудования, допустимого к установке, и условия решения прикладной задачи.

Автоматизированное построение вычислительной подсистемы цифрового двойника осуществляется в соответствии с предложенной в данной работе методикой, которая включает следующие этапы (рис. 4).

Этап 1. Автоматизированное построение модели вычислительной подсистемы.

Данный этап предполагает построение модели в автоматизированном режиме. Эта модель описывает вычислительную подсистему цифрового двойника ИЭС и представляет собой набор структур данных, описывающих вычислительную подсистему.

В ходе этого процесса решаются следующие подзадачи:

1. Выбор методики решения задачи на основе описания задачи проектирования с использованием цифрового двойника ИЭС.
2. Определение программного компонента, реализующего методику решения проектной задачи, на основе онтологии программного обеспечения.
3. Определение методов и алгоритмов, необходимых для решения задачи, в соответствии с описанием методики.
4. Определение программных компонентов, реализующих необходимые методы и алгоритмы, на основе онтологии программного обеспечения.

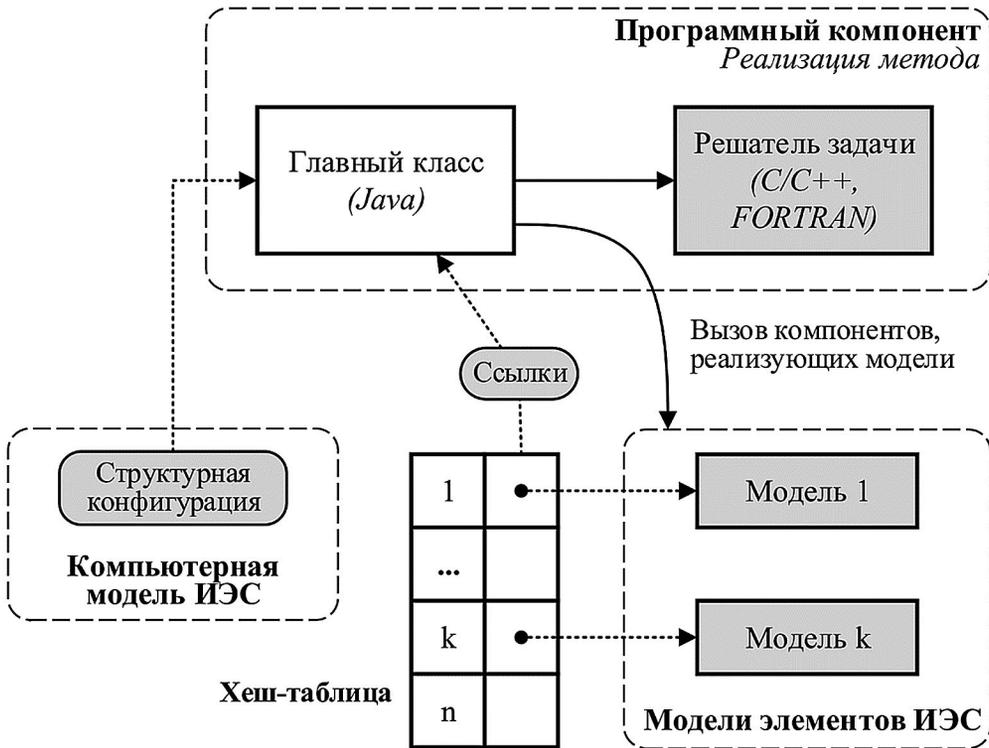


Рис. 3. Иллюстрация интеграции методов и моделей.

5. Составление списка моделируемого оборудования на основе описания сетевой конфигурации цифрового двойника ИЭС.

6. Определение программных компонентов, реализующих модели необходимых элементов ИЭС, на основе онтологии программного обеспечения.

7. Загрузка описания необходимых программных компонентов из онтологии программного обеспечения.

8. Построение структур данных, описывающих необходимые программные компоненты.

9. Конструирование общей модели строящейся вычислительной подсистемы.

Этап 2. Автоматизированное построение вычислительной подсистемы цифрового двойника на основе его модели с использованием современных средств метапрограммирования.

На этом этапе решаются следующие подзадачи:

1. Настройка загрузчика программных компонентов на работу с необходимыми библиотеками компонентов.

2. Загрузка программных компонентов, реализующих общую методику решения задачи, математические методы и алгоритмы.

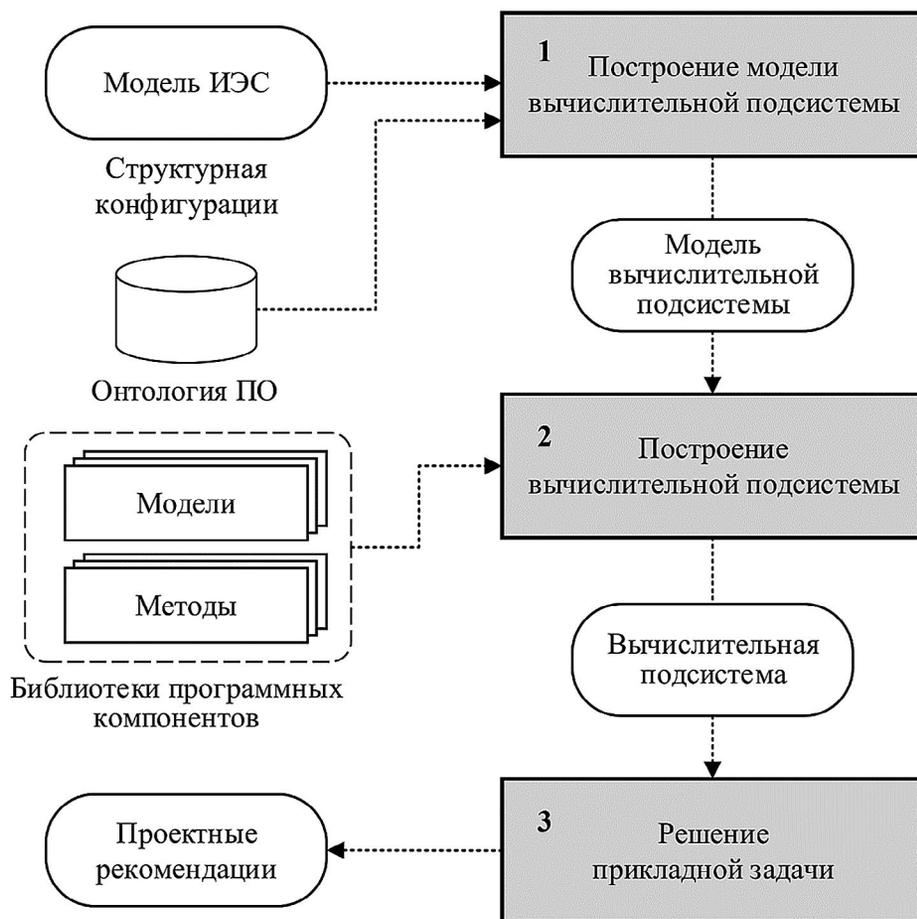


Рис. 4. Содержание методики автоматизированного построения вычислительной подсистемы цифрового двойника.

3. Построение структур данных для хранения программных компонентов, загруженных на предыдущем шаге.
4. Загрузка программных компонентов, реализующих модели элементов ИЭС.
5. Построение структур данных для хранения программных компонентов, загруженных на предыдущем шаге.

Этап 3. Применение цифрового двойника при разработке рекомендаций по проектированию ИЭС.

Данный этап предполагает решение прикладных задач. В ходе этого процесса происходит интеграция методов и моделей элементов ИЭС. Схема взаимодействия программных компонентов при автоматизированном построении вычислительной подсистемы цифрового двойника в соответствии с предлагаемой методикой приведена на рис. 5.

Автоматизированное построение вычислительной подсистемы цифрового двойника ИЭС опирается на современные средства метапрограммирования. Используется рефлексия, которая представляет собой разновидность метапрограммирования и является расширением парадигмы объектно-ориентированного программирования. Рефлексия позволяет выполнять операции, которые невозможно осуществить в классическом объектно-ориентированном программировании. Наиболее важными из них являются изучение классов в процессе выполнения программы, определение их полей, методов и конструкторов, создание новых экземпляров объектов по имени класса с помощью конструкторов, установка и получение значений полей по их имени, вызов методов по их имени и описанию аргумента, гибкая работа с массивами и контейнерами (коллекциями). С помощью рефлексии компоненты динамически подключаются к конструируемой программной системе и настраиваются для решения поставленной задачи.

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Предложенный в статье методический подход использован для программной реализации прототипа программной платформы для решения задач проектирования ИЭС. На базе платформы построен цифровой двойник ИЭС одного из районов г. Иркутска. Расчетная схема системы представлена на рис. 6. За основу взяты действующие в настоящее время системы электроснабжения и отопления. Кроме того, для рассмотрения одного из возможных вариантов их развития в схему включены активные потребители с их источниками электрической и тепловой энергии. Представленная схема включает в себя следующие субъекты: семь обычных потребителей; восемь активных потребителей; восемь электрических бойлеров для выработки тепла; восемь фотоэлектрических систем для выработки электроэнергии; шестнадцать кабельных линий; двадцать три тепловые магистрали; один централизованный источник электрической энергии и один централизованный источник тепловой энергии.

На разработанном прототипе программной платформы был проведен вычислительный эксперимент по развитию ИЭС. На основе расчетов было найдено компромиссное решение по распределению мощности между централизованными и распределенными источниками энергии в ИЭС. Мощность централизованных источников в системах электроснабжения и теплоснабжения составила 35 МВт и 54 Гкал/ч соответственно. При таких значениях не происходит увеличения стоимости централизованного энергоснабжения потребителей. В этом случае общие затраты на отопление составляют 2171.5 тыс. руб., на электроснабжение – 1816.8 тыс. руб.

Проведенный вычислительный эксперимент показывает работоспособность и эффективность предложенных решений, которые позволили снизить общую стоимость энергоснабжения потребителей за счет перераспределения мощности между централизованными и распределенными источниками генерации в процессе развития ИЭС.

ВЫВОДЫ

Построение ИЭС на базе традиционных энергосистем, работающих раздельно, обеспечивает повышение эффективности и надежности энергоснабжения потребителя. Проектирование ИЭС может быть сложной задачей вследствие высокой сложности

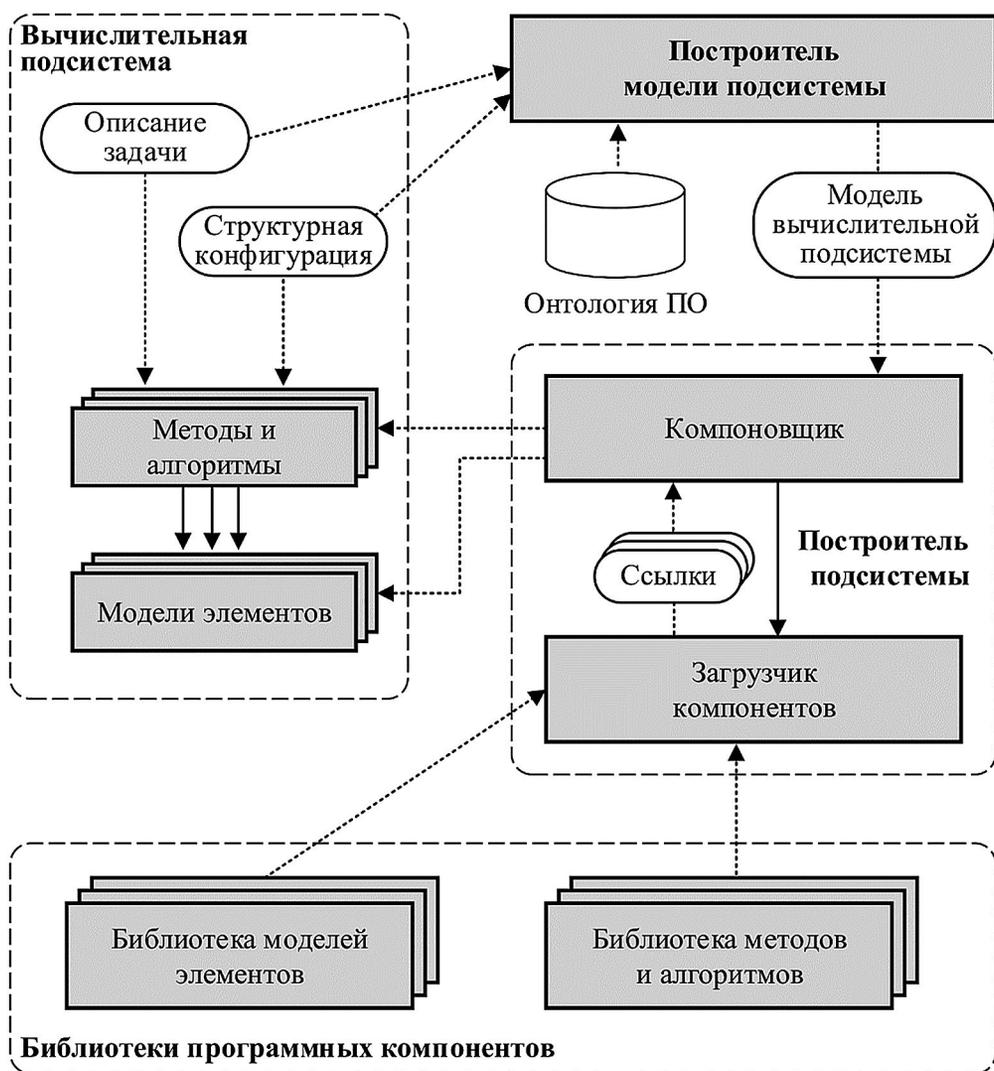


Рис. 5. Общая схема построения вычислительной подсистемы цифрового двойника.

этих систем. Цифровой двойник позволяет объединить все необходимые для проектирования инструменты в едином информационном пространстве. Программные средства, реализующие цифровые двойники ИЭС и разрабатываемые для их проектирования, требуют высокой гибкости в организации расчетов. Это требование необходимо для моделирования различных типов оборудования и привлечения широкого спектра методов и математических моделей. Автоматизация построения вычислительной подсистемы является эффективным решением для преодоления указанных трудностей. В статье предложен новый методический подход к автоматизации построения вычислительной подсистемы цифрового двойника ИЭС. В соответствии с этим подходом автоматизированное построение осуществляется с использованием современных

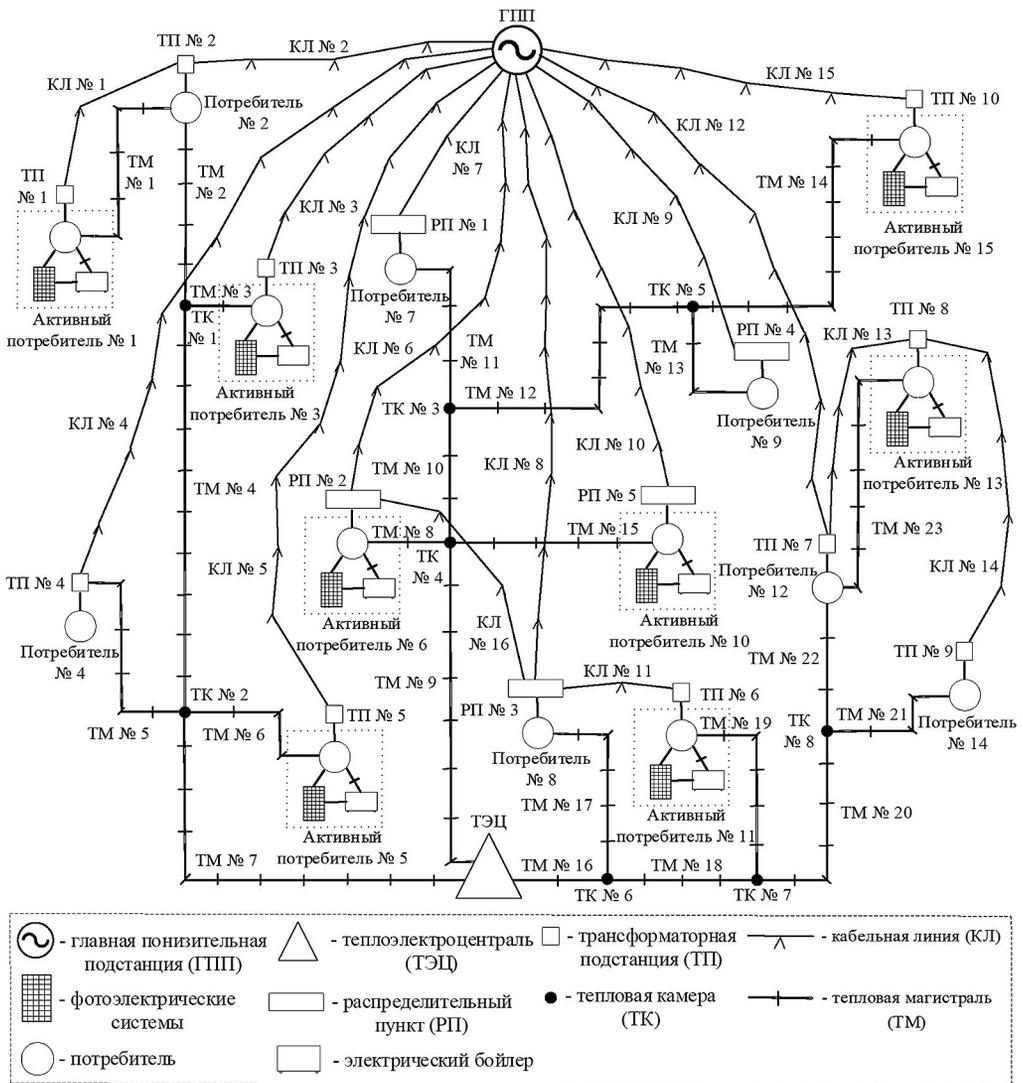


Рис. 6. Схема ИЭС района г. Иркутска.

средств метапрограммирования на базе программной платформы. В процессе построения реализуется методология MDE и используются знания, формализованные в виде онтологий.

В статье представлены составляющие предлагаемого методического подхода к автоматизации построения вычислительной подсистемы цифрового двойника, включающие принципы разработки программной платформы; архитектуру программной платформы; методику автоматизированного построения вычислительной подсистемы цифрового двойника; принципы обеспечения универсальности программных компонентов.

Цифровой двойник, полученный в результате применения предложенного методического подхода, позволяет проводить компьютерное и математическое моделирование ИЭС в виртуальном пространстве и исследовать его различные конфигурации. Моделирование на основе цифрового двойника ИЭС позволяет реализовать гибкие и эффективные подходы к проектированию ИЭС и получить рекомендации по проектированию для создания реальных ИЭС.

Исследование выполнено в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-29-01611).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Grievies M.* Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication, white paper // Whitepaper, Florida Institute of Technology: Florida, USA, 2015. P. 1–7.
2. *Hu W., Zhang T., Deng X., Liu Z., Tan J.* Digital twin: a state-of-the-art review of its enabling technologies, applications and challenges // *Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment*, 2021. V. 2. № 1. P. 1–34.
3. *Tao F., Cheng J., Qi Q., Zhang M., Zhang H., Sui F.* Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018. V. 94. P. 3563–3576.
4. *Adamenko D., Kunnen S., Nagarajah A.* Digital twin and product lifecycle management: What is the difference? // *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 2020. V. 594. P. 150–162.
5. *Malakuti S., Schmitt J., Platenius-Mohr M., Grüner S., Gitzel R., Bihani P.* A four-layer architecture pattern for constructing and managing digital twins // In *Software Architecture. ECSA 2019. Lecture Notes in Computer Science*, 2019. V. 11681. P. 231–246.
6. *Redelinghuys A.J.H., Kruger K., Basson A.* A six-layer architecture for digital twins with aggregation // In *Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future. SOHOMA 2019. Studies in Computational Intelligence*, 2020. V. 853. P. 171–182.
7. *Qi Q., Tao F., Hu T., Anwer N., Liu A., Wei Y., Wang L., Nee A.Y.C.* Enabling technologies and tools for digital twin // *Journal of Manufacturing Systems*, 2021. V. 58. P. 3–21.
8. *Fonseca Í.A., Gaspar H.M., Mello de P.C., Sasaki H.A.U.* A Standards-Based Digital Twin of an Experiment with a Scale Model Ship // *Computer-Aided Design*, 2022. V. 145. 103191.
9. *Sharma A., Kosasih E., Zhang J., Brintrup A., Calinescu A.* Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions // *Journal of Industrial Information Integration*, 2022. V. 30. 100383.
10. *Воронай Н.И., Массель Л.В., Колосок И.Н., Массель А.Г.* ИТ-инфраструктура для построения интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики на основе цифровых двойников и цифровых образов // *Известия Российской академии наук. Энергетика*, 2021. № 1. С. 3–13.
11. *Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.C.* Digital Twin in Industry: State-of-the-Art // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019. V. 15. № 4. P. 2405–2415.
12. *Kasper L., Birkelbach F., Schwarzmayr P., Steindl G., Ramsauer D., Hofmann R.* Toward a Practical Digital Twin Platform Tailored to the Requirements of Industrial Energy Systems // *Applied Sciences*, 2022. V. 12. № 14. 6981.

13. *Li H., Zhang T., Huang Y.* Digital Twin Technology for Integrated Energy System and Its Application // In Proceedings of the 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence), Beijing, China, 15 July–15 August 2021; IEEE: New York, NY, USA, 2021. P. 422–425.
14. *Chen Y., Chen Q., Gao J., Li Z., Chen X.* Hardware-in-loop based Digital Twin Technology for Integrated Energy System: A Case Study of Guanyang Island in Chongqing // In Proceedings of the 5th International Electrical and Energy Conference, Nanjing, China, 27–29 May 2022; IEEE: New York, NY, USA, 2022. P. 4956–4962.
15. *Bai H., Yuan Z., Tang X., Liu J., Yang W., Pan S., Xue Y., Liu W.* Automatic Modeling and Optimization for The Digital twin of a Regional Multi-energy System // In Proceedings of the Power System and Green Energy Conference, Shanghai, China, 25–27 August 2022; IEEE: New York, NY, USA, 2022. P. 214–219.
16. *Huang W., Zhang Y., Zeng W.* Development and application of digital twin technology for integrated regional energy systems in smart cities // Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2022. V. 36. 100781.
17. *Xing J., Sun S., Yu P., Li Y., Cheng Y., Wang Y., Li S., Zhu J.* Multi-energy Simulation and Optimal Scheduling Strategy Based on Digital Twin // 2022 Power System and Green Energy Conference (PSGEC), Shanghai, China, 2022. P. 96–100.
18. *Sharif Ullah A.M.M.* Modeling and simulation of complex manufacturing phenomena using sensor signals from the perspective of Industry 4.0 // Advanced Engineering Informatics, 2019. V. 39. P. 1–13.
19. *Kannan K., Arunachalam N.* A Digital Twin for Grinding Wheel: An Information Sharing Platform for Sustainable Grinding Process // Journal Manufacturing Science Engineering, 2019. V. 141. № 2. 021015.
20. *Moreno A., Velez G., Ardanza A., Barandiaran I., de Infante Á.R., Chopitea R.* Virtualisation process of a sheet metal punching machine within the Industry 4.0 vision // International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 2017. V. 11. P. 365–373.
21. *Singh S., Shehab E., Higgins N., Fowler K., Reynolds D., Erkoyuncu J.A., Gadd P.* Data management for developing digital twin ontology model // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2020. V. 235. № 14. P. 2323–2337.
22. *Steindl G., Stagl M., Kasper L., Kastner W., Hofmann R.* Generic Digital Twin Architecture for Industrial Energy Systems // Applied Sciences, 2020. V. 10. № 24. 8903.
23. *Steinmetz C., Rettberg A., Ribeiro F.G.C., Schroeder G., Pereira C.E.* Internet of Things Ontology for Digital Twin in Cyber Physical Systems // In Proceedings of the VIII Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering, Salvador, Brazil, 5–8 November 2018; IEEE: New York, NY, USA, 2018. P. 154–159.
24. *Масель Л.В., Ворожцова Т.Н.* Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики // Онтология проектирования, 2020. Т. 10. №3 (37). С. 327–337.
25. GE, PREDIX [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin> (дата обращения: 05.09.2023).
26. Azure Digital Twins [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/digital-twins/> (дата обращения: 05.09.2023).
27. Paladin DesignBase [Электронный ресурс]. URL: <https://www.easypower.com/products/paladin-designbase> (дата обращения: 05.09.2023).

28. *Dani A.A.H., Supangkat S.H., Lubis F.F., Nugraha I.G.B.B., Kinanda R., Rizkia I.* Development of a Smart City Platform Based on Digital Twin Technology for Monitoring and Supporting Decision-Making // *Sustainability*, 2023. V. 15. 14002.
29. *Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I.* The Unified Modeling Language User Guide, 2nd. ed. / Addison Wesley, Boston, 2005. P. 475.
30. *Booch G.* Object-Oriented Analysis and Design with Applications, 3rd. ed. / Addison Wesley, Boston, 2007. P. 720.
31. *Silva da A.R.* Model-driven engineering: A survey supported by the unified conceptual model // *Computer Languages, Systems & Structures*, 2015. V. 43. P. 139–155.
32. *Brambilla M., Cabot J., Wimmer M.* Model-driven software engineering in practice. In *Synthesis Lectures on Software Engineering*; Morgan & Claypool: Kentfield, CA, USA, 2012. P. 191.
33. *Seixas J., Ribeiro A., Rodrigues da Silva A.* A Model-Driven Approach for Developing Responsive Web Apps // *Proceedings of the 14th International Conference ENASE 2019*. SciTePress, Setubal, 2019. P. 257–264.
34. *Akdur D., Garousi V., Demirörs O.* A survey on modeling and model-driven engineering practices in the embedded software industry // *Journal of Systems Architecture*, 2018. V. 91. P. 62–82.
35. *Stennikov V.A., Barakhtenko E.A., Sokolov D.V.* Development of Information and Technology Platform for Optimal Design of Heating Systems // In *Proceedings of the 7th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support*. 28–29 May 2019, Ufa, Russia; Atlantis Press: Paris, France, 2019.
36. *Boussaid I., Siarry P., Ahmed-Nacer M.* A survey on search-based model-driven engineering // *Automated Software Engineering*, 2017. V. 24. P. 233–294.
37. *Al-Azzoni I., Blank J., Petrović N.* A Model-Driven Approach for Solving the Software Component Allocation Problem // *Algorithms*, 2021. V. 14. 354.
38. *Araújo Silva E., Valentin E., Carvalho J.R.H., Silva Barreto R.* A survey of Model Driven Engineering in robotics // *Journal of Computer Languages*, 2021. V. 62. 101021.
39. *Stennikov V., Barakhtenko E., Sokolov D., Mayorov G.* Principles of Building Digital Twins to Design Integrated Energy Systems // *Computation*, 2022. V. 10. 222.
40. *Hazzard K., Bock J.* *Metaprogramming in NET* / Manning Publications: Shelter Island, NY, USA, 2013. P. 360.
41. *Lämmel R.* *Software Languages: Syntax, Semantics, and Metaprogramming* / Springer: Cham, Switzerland, 2018.
42. *Stennikov V.A., Barakhtenko E.A., Sokolov D.V.* A Methodological Approach to the Software Development for Heating System Design // In *Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies*, Vladivostok, Russia, 3–4 October 2018; IEEE: New York, NY, USA, 2018.

Automation of Computations in Designing an Integrated Energy System Based on Its Digital Twin

V. A. Stennikov, E. A. Barakhtenko*, D. V. Sokolov, G. S. Mayorov

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

**e-mail: barakhtenko@isem.irk.ru*

The construction of integrated energy systems (IESs) based on traditional energy systems operating separately provides higher efficiency and reliability of energy supply to consumers. However, IESs are complex structures to design. A digital twin is a tool that allows you to combine all the tools necessary for design in a single information space. Software tools that implement the digital twin of IESs require high computational flexibility, which is due to the need to simulate a variety of equipment and involve a wide range of methods and mathematical models. Automating the construction process of a computing subsystem is a highly efficient solution for overcoming the challenges mentioned above. This paper proposes a methodological approach to automating the construction of the computing subsystem of the digital twin of an IES. The proposed approach involves using modern metaprogramming tools on a software platform to perform automated construction. During construction, the Model-Driven Engineering concept is implemented and knowledge formalized in the form of ontologies is used. The digital twin, obtained as a result of the practical application of the proposed methodological approach, enables computer and mathematical modeling of an IES in virtual space, with exploration of various configurations of its construction.

Keywords: integrated energy system, ontology, automation of calculations, automation of programming, Model-Driven Engineering, digital twin