

УДК 004.942

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИХ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

© 2025 г. В. А. Стенников¹, Е. А. Барахтенко^{1, *}, Д. В. Соколов¹, Г. С. Майоров¹

¹Федеральное 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 20.10.2023 г.

После доработки 23.12.2024 г.

Принята к публикации 26.12.2024 г.

Проектирование интегрированных энергетических систем (ИЭС) представляет собой сложную задачу, что вызвано сетевой конфигурацией, широким спектром используемого оборудования и математических моделей подсистем ИЭС. Цифровой двойник позволяет моделировать в виртуальном пространстве различные конфигурации ИЭС и получать оптимальный вариант построения исследуемой системы. В статье предложены принципы построения цифровых двойников для решения задач проектирования ИЭС. Представлен разработанный авторами методический подход к проектированию ИЭС на основе ее цифрового двойника. Приведены результаты моделирования тестовой схемы энергоснабжения, полученные на программной реализации компонентов цифрового двойника ИЭС.

Ключевые слова: интегрированная энергетическая система, цифровой двойник, автоматизация программирования, программная платформа, проектирование энергосистем

DOI: 10.31857/S0002331025010021

ВВЕДЕНИЕ

Создание новой структуры энергопроизводства на базе нескольких отдельно функционирующих энергетических (электро-, тепло-, газоснабжения и др.) систем в виде интегрированной энергетической системы (ИЭС) значительно расширяет их функциональные возможности, обеспечивает взаимозаменяемость энергоносителей и реализует синергетический эффект, обеспечивающий надежное, безопасное, более экономичное и экологичное энергоснабжение [1, 2]. ИЭС представляют собой сложные инженерные системы, объединяющие в единый комплекс энерготехнологические, информационные, телекоммуникационные системы. Они отличаются сложной конфигурацией, широкой номенклатурой применяемого оборудования, необходимостью обеспечения различных условий эксплуатации и координации отдельных систем как подсистем единой системы. ИЭС обладают относительно высокой стоимостью проектирования, строительства, развития, управления и обслуживания в процессе

эксплуатации. Эти системы имеют большое значение для экономики и социальной жизни общества. Изменения в ИЭС и управляющие воздействия на них должны быть обоснованы и не иметь негативных последствий. Перечисленные особенности ИЭС диктуют необходимость опираться на научно и теоретически обоснованные средства их проектирования и разработки. Необходимо также применять математический инструментарий, объединяющий математические модели, современные методы вычислительной математики и эффективные программные реализации алгоритмов. При исследовании ИЭС на компьютерных моделях рассматриваются различные варианты их построения, предполагающие создание или изменение конфигурации реальной энергетической системы, а также изменение условий эксплуатации. Это позволяет избежать рисков экономических потерь и несоответствия условий эксплуатации ИЭС техническим требованиям и ограничениям.

В статье представлены принципы построения цифровых двойников ИЭС и их применение при решении задач проектирования этих систем. Цифровые двойники позволяют проводить моделирование в виртуальном пространстве и исследовать различные конфигурации построения ИЭС. Преимущество цифровых двойников заключается в том, что свойства реальной системы можно перенести на объект, существующий в виртуальном пространстве, и изучать этот объект с помощью компьютерных и математических моделей. Решение этой задачи позволяет получить оптимальный научно и экономически обоснованный вариант ИЭС, который может быть реализован при построении или развитии реальной ИЭС (рис. 1). Использование цифровых двойников позволяет повысить эффективность проектирования и качество получаемых проектных решений.

ПРЕДПОСЫЛКИ ПЕРЕХОДА НА ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ

При проектировании и развитии ИЭС необходимо учитывать следующие тенденции:

- 1) повышаются требования к качеству и надежности снабжения энергией потребителей;
- 2) потребитель становится более активным (может самостоятельно выбирать тип энергоснабжения и вид энергоносителя, участвовать в реагировании на спрос и др.);
- 3) системы переходят на дистанционный мониторинг производственных фондов в реальном времени, который интегрируется в корпоративные системы управления



Рис. 1. Проектирование интегрированной энергетической системы на основе ее цифрового двойника.

для более эффективной оптимизации условий эксплуатации и совершенствования процессов эксплуатации, ремонта и замены оборудования в зависимости от его состояния, что позволяет снизить общие системные затраты;

4) возникает необходимость обеспечения быстрой обработки большого объема данных для управления ИЭС.

В настоящее время цифровизация инфраструктурных энергетических систем развивается быстрыми темпами. Имеются многочисленные примеры успешного внедрения интеллектуальных цифровых технологий в электроэнергетических, тепловых и газовых системах. Преимущества цифровизации энергетики определяются значительным повышением надежности энергоснабжения и качества энергии и энергетических услуг, радикальным изменением парадигмы взаимоотношений между участниками энергоснабжения на принципах Интернета энергии, достижением масштабных экономических эффектов для всех заинтересованных сторон, повышением эффективности принимаемых решений и результативности работы персонала компаний. Эффективные интеллектуальные энергетические системы невозможны без активного привлечения современных передовых информационно-коммуникационных технологий и средств цифрового интеллекта, которые обеспечивают возможность гибкого управления расширением и функционированием ИЭС, координации подсистем и достижения общесистемных целей. Все это делает энергетические системы сложными киберфизическими системами и вызывает необходимость использования цифровых двойников, которые существуют в виртуальном пространстве и имеют двунаправленные связи с реальным физическим объектом для отражения решений из одного пространства в другое.

Идея цифрового двойника была впервые предложена Дэвидом Гелернтером [3], а концепция цифрового двойника была применена к производственному процессу Майклом Гривзом. В настоящее время под термином “цифровой двойник” понимается представление всех компонентов объекта на протяжении его жизненного цикла на основе физических данных, виртуальных данных и данных о взаимодействии между ними [3, 4]. По мнению экспертов, цифровой двойник является одним из наиболее перспективных подходов к реализации концепции четвертой промышленной революции (Industry 4.0) [4, 5, 6]. Эта концепция предполагает создание киберфизических систем и использование концепций цифрового двойника и Интернета вещей, что повышает эффективность обслуживания и эксплуатации инженерных систем, в том числе в энергетике. С помощью цифровых двойников можно изучать поведение вновь устанавливаемого оборудования еще до его монтажа на реальных энергетических объектах, его совместимость с другими системами и влияние на них, моделировать самые сложные технические ситуации, включая отказы оборудования, изменение выработки энергии на возобновляемых источниках энергии и поведения потребителей, внешние воздействия, неправильные действия персонала ([7] и др.). В исследовании, представленном в работе [8], рассматриваются возможности методов и подходов на основе цифровых двойников, которые призваны создать интеллектуальную систему оптимизации и автоматизации управления энергопотреблением в жилом помещении с помощью модели данных, интегрированной с Интернетом вещей, искусственным интеллектом и машинным обучением. В исследовании [5] используют концепцию “киберфизической энергосистемы”, в которой управление энергосистемой опирается на цифровые двойники. Результаты этого исследования показывают, что технология цифровых двойников позволяет оптимизировать количество управляющих воздействий на энергосистему

и рационально подобрать ее рабочие параметры. В исследовании, проведенном в работе [9], анализируется влияние оптимизации политики технического обслуживания на энергоэффективность и выбросы вредных веществ как для традиционных, так и для киберфизических производственных систем, причем моделирование осуществляется на основе цифровых двойников. В работе [10] предложен многоуровневый цифровой двойник энергосистемы, основанный на данных и отражающий реальное энергопотребление домохозяйств с использованием технологии “Интернет вещей”. В исследовании [11] разработан подход к прогнозированию энергопотребления на сутки вперед с использованием данных, полученных из модели цифрового двойника здания. В исследовании, проведенном в работе [12], предлагается метод планирования на сутки вперед на основе цифрового двойника, учитывающий координацию между различными преобразователями мощности в ИЭС, что позволяет повысить энергоэффективность, снизить затраты и уменьшить выбросы углерода.

В настоящее время исследователи в области энергетики активно работают над методологическими основами создания и внедрения цифровых двойников. В статье [13] предлагается подход к построению ИТ-инфраструктуры для создания интеллектуальных систем управления развитием и эксплуатацией энергосистем на основе результатов системных исследований в энергетике, в которых используются современные концепции (цифровые двойники и цифровые изображения). В работе [14] дается обзор состояния исследований цифровых двойников с точки зрения ключевых компонентов, текущих разработок и основных областей применения цифровых двойников в промышленности. В исследовании, проведенном в работе [15], определены наиболее важные требования к цифровым двойникам промышленных энергетических систем. В настоящее время существуют работы, в которых рассматриваются особенности применения технологии цифровых двойников для ИЭС. В работе [16] рассматривается техническая основа технологии цифрового двойника ИЭС и анализируется ее применение. В работе [17] рассматривается подход к использованию технологии цифрового двойника в ИЭС и предлагается аппаратная инфраструктура цифрового двойника. В работе [18] для решения задач управления ИЭС предложена структура цифрового двойника. Авторы описывают процесс автоматизации генерации модели для обеспечения наиболее близкого соответствия между цифровой моделью из виртуального пространства и моделируемой физической системой.

Некоторые исследователи предлагают использовать семантические сети при создании цифровых двойников [19, 20]. Основой для разработки цифровых двойников могут служить онтологии. Рассмотрим некоторые примеры использования онтологий для реализации цифровых двойников. В исследовании, проведенном в работе [21], анализируются проблемы управления данными цифровых двойников. Для решения этих проблем авторы предлагают использовать онтологии. Предложенный подход обеспечивает гибкость хранения знаний на протяжении всего жизненного цикла цифрового двойника. В работе [22] представлена общая архитектура цифровых двойников промышленных энергетических систем для обеспечения гибкости и оптимизации работы этих систем. Для хранения информации о ресурсах и сервисах используются онтологии. Используется иерархический подход к проектированию, состоящий из онтологии верхнего уровня и онтологии предметной области. В работе [23] онтология рассматривается как представление цифрового двойника в контексте киберфизических систем. В работе [24] рассматриваются предпосылки применения онтологического подхода к построению цифровых двойников

на основе результатов, имеющихся в области онтологического инжиниринга энергетических систем.

Далее мы рассмотрим подходы и программные средства для создания цифровых двойников. Компания Microsoft основала сервис Azure Digital Twins, который обеспечивает построение цифровых двойников объектов реального мира и использует онтологии для их описания [25]. Компания General Electric разрабатывает и внедряет технологию цифрового двойника на базе платформы PREDIX [26]. Этот продукт предназначен для промышленности и позволяет работать с цифровыми двойниками. Американская компания Paladin Gateway разработала и внедрила платформу Power Analytics [27], которая представляет собой набор электроэнергетических сервисов с возможностью их размещения в облаке. Эти сервисы позволяют создавать цифровые двойники, обмениваясь информацией, полученной в результате мониторинга энергосистем, с инструментами управления. Для создания универсальной межотраслевой среды компания ABB создала продукт ABBAbility [28] на основе технологии AspectObject, с помощью которого можно создать цифровой двойник реального оборудования.

Приведенные в обзоре исследования отражают концептуальные принципы создания цифровых двойников, а также инструменты и подходы, используемые при их разработке и практическом применении. Они в определенной степени представляют передовой опыт создания цифровых двойников в энергетике. В обзоре показано, что при построении цифровых двойников энергетических объектов могут использоваться онтологии, которые представляют знания в форме, пригодной для их активного использования в качестве самостоятельного ресурса. Анализ исследований применимости концепции цифровых двойников подтверждает актуальность цифровых двойников при их создании для проектирования ИЭС.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Цифровой двойник ИЭС является имитацией реальной физической ИЭС. Поэтому при решении задач проектирования ИЭС или развития (оптимизации) существующей ИЭС ее цифровой двойник должен отражать текущее состояние системы и ее возможные состояния в будущем в различные временные периоды, для которых определяются объем и последовательность реализации проектных решений с целью достижения требуемых показателей ИЭС. Полученные проектные решения основываются на расчетах, проводимых с целью нахождения рационального изменения ИЭС, ее структуры и параметров при заданных условиях, ограничениях и рассматриваемых сценариях. Цифровые двойники ИЭС должны позволять отслеживать динамику развития ИЭС во времени, строить проектные решения для различных временных периодов, рассматривать возможные сценарии развития системы.

При проектировании ИЭС с помощью цифрового двойника следует учитывать, что ИЭС являются сложными техническими системами, и их исследование опирается на подходы, основанные на иерархическом моделировании, что позволяет исследовать различные ИЭС. ИЭС состоят из различных типов энергетических систем, которые являются подсистемами ИЭС. Каждая из подсистем содержит свой набор компонентов. Эти компоненты можно сгруппировать по следующим энергетическим функциям: генерация, передача, распределение и потребление. В свою очередь, каждый компонент имеет свой набор оборудования в соответствии с выполняемыми

энергетическими функциями и типом энергосистемы, в которую он входит. Моделирование проводится для всех подсистем, их наборов компонентов и оборудования. В то же время существуют характерные особенности моделирования при совместном рассмотрении систем различных типов в рамках ИЭС. Эти особенности связаны с техническими и технологическими интеграционными решениями, поэтому для обеспечения координации подсистем и реализации общесистемных целей необходимо проводить моделирование отдельных подсистем. Использование иерархического моделирования также дает возможность совместного исследования систем разного масштаба путем агрегирования информации по отдельным системам меньшего масштаба и представления ее для координации более крупных систем или, наоборот, координации работы крупных систем с более мелкими за счет дезагрегирования информации.

В 1960-х годах советский ученый В.Я. Хасилев заложил основы теории гидравлических схем, которая представляет собой научную дисциплину, интегрирующую достижения различных отраслей науки для построения единой физико-математической основы анализа, проектирования и управления трубопроводными системами [29]. В рамках представленного в статье исследования эта теория лежит в основе моделирования трубопроводных систем различного типа и назначения в рамках ИЭС. Моделирование ИЭС требует гибкой организации вычислительного процесса с целью учета динамики изменения параметров энергообеспечения подсистем ИЭС в течение расчетного периода, наличия в ИЭС активных компонентов и подсистем, а также координации их работы. В работе [30] для моделирования ИЭС с учетом описанных особенностей предложен подход, основанный на мультиагентных технологиях.

Необходимо разработать единый методический подход, объединяющий математические модели и методы теории гидравлических цепей и теории электрических цепей [39], т.е. подход к моделированию ИЭС на основе мультиагентных технологий в единую методологическую базу. При программной реализации данного подхода возникает проблема, связанная с высокой сложностью поддержания в актуальном состоянии всего набора необходимых программных компонентов, реализующих математические модели оборудования различных подсистем ИЭС. Для преодоления этой проблемы необходимо привлечение парадигм программирования, ориентированных на автоматизацию этапов проектирования программного обеспечения. На основе проведенных исследований предложена методология Model-Driven Engineering (MDE), которая представляет собой совокупность принципов и подходов к автоматизированному построению сложных программных систем на основе заранее разработанных моделей [32, 33].

Энергетические системы определенного типа имеют специфические для данного типа свойства, набор прикладных задач и специализированное программное обеспечение (ПО), используемое для их решения. Знания о них должны храниться в форме, пригодной для обработки программными системами и использования при решении различных проектных задач. Для этого необходимо организовать хранение этих знаний в виде онтологий [34, 35]. Построение и применение цифровых двойников опирается на онтологии, которые позволяют формально описать объекты предметной области, их свойства и связи между ними.

Принципы построения цифровых двойников, предназначенных для решения задач проектирования ИЭС, включают:

- 1) проведение сложных инженерных расчетов для поиска оптимальных способов преобразования ИЭС с целью повышения эффективности и надежности их работы;
- 2) моделирование ИЭС, включающих различные типы энергосистем с их индивидуальными характеристиками, с учетом иерархического принципа их построения;
- 3) единое информационное пространство, организованное для решения задач проектирования ИЭС;
- 4) двунаправленная связь между внешней средой и цифровым двойником ИЭС для отслеживания изменений и обновления информации в цифровом двойнике и генерации проектных решений ИЭС;
- 5) отслеживание динамики развития ИЭС во времени;
- 6) учет множественности центров принятия решений по обеспечению энергией различных типов с возможностью преобразования одного типа в другой при решении задач проектирования ИЭС;
- 7) необходимость учета большого числа компонентов ИЭС со сложным поведением;
- 8) знания об ИЭС, ее подсистемах, используемом ПО и особенностях решения задач проектирования ИЭС.

ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ЕЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

На основе принципов, сформулированных в разделе 3, разработан методический подход к проектированию ИЭС на базе ее цифрового двойника. Предлагаемый подход предполагает построение инженером компьютерной модели ИЭС. На основе этой модели в автоматизированном режиме строится вычислительная подсистема цифрового двойника. Результаты моделирования используются для подготовки проектных рекомендаций и, в конечном итоге, для создания и развития реальной ИЭС. В свою очередь, имея данные о характеристиках реальной ИЭС, можно актуализировать цифровой двойник, выполнить повторное моделирование системы и подготовить новые проектные рекомендации.

Предлагаемый методологический подход включает в себя следующие компоненты:

- 1) архитектуру программной платформы для создания цифровых двойников;
- 2) набор технологий и инструментов для реализации платформы;
- 3) методы автоматизированного построения цифрового двойника на основе концепции MDE;
- 4) методику решения задачи проектирования ИЭС на основе ее цифрового двойника;
- 5) принципы организации вычислительного процесса с использованием мультиагентного подхода.

Архитектура программной платформы для создания цифровых двойников представлена на рис. 2. Она включает в себя графическую подсистему, вычислительную подсистему, подсистему хранения данных и систему онтологий. Графическая подсистема предназначена для построения графической модели ИЭС и работы с ней. Вычислительная подсистема организует вычислительный процесс решения

прикладной задачи. В рамках этой подсистемы выполняется автоматизированная интеграция программных компонентов, реализующих модели элементов ИЭС, методы и алгоритмы для решения задач проектирования ИЭС. Подсистема хранения данных используется для долговременного хранения данных, описывающих сетевую конфигурацию ИЭС и характеристики ее элементов. Система онтологий включает в себя онтологию ИЭС (описание подсистем и элементов ИЭС и их характеристик), онтология задач (описание прикладных задач и их взаимосвязи в рамках процесса проектирования) и онтология ПО (описание используемых программных компонентов). Передача данных между подсистемами платформы выполняется с использованием универсальных форматов JSON и XML.

Разработка методического подхода к построению программной платформы опирается на элементы структурного, объектно-ориентированного и компонентного программирования, теорию алгоритмов и теорию баз данных. В качестве средств

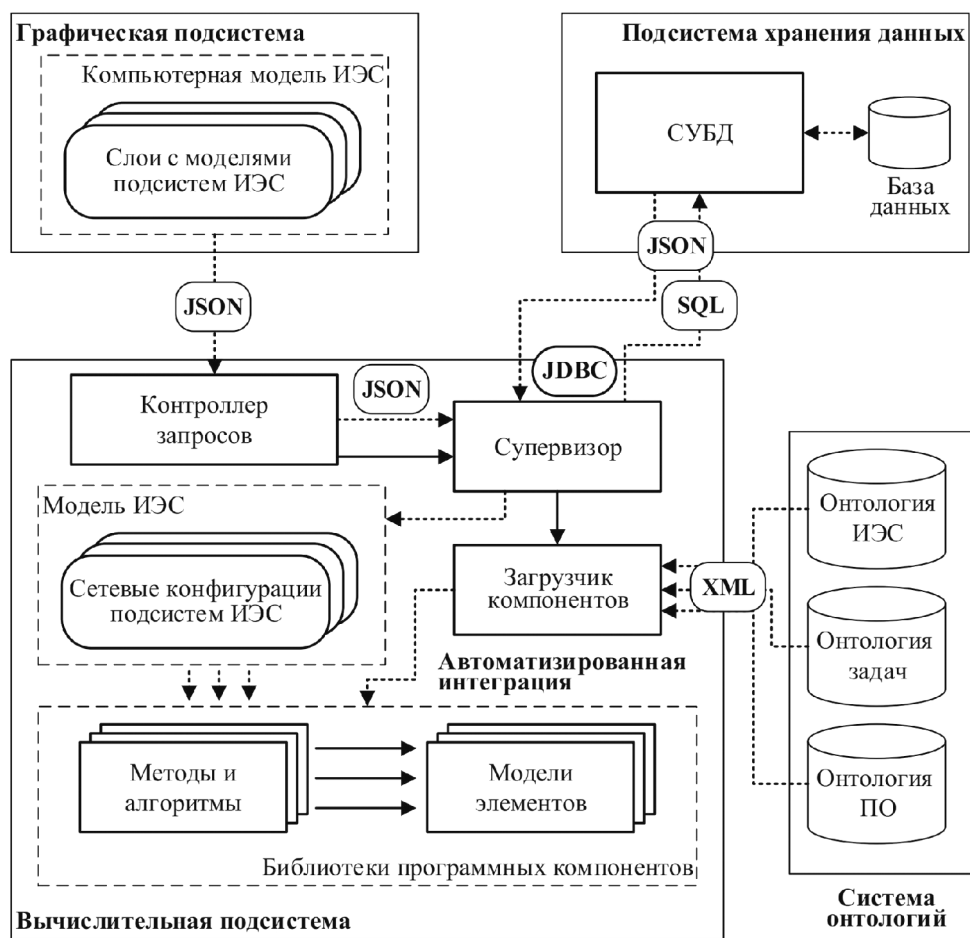


Рис. 2. Архитектура программной платформы для создания цифровых двойников интегрированных энергетических систем.

программной реализации используются язык программирования Java, компилятор JDK (Java Development Kit), математические библиотеки (Parallel Colt, JAMA, Lpsolve и др.), среда разработки Eclipse, система управления базами данных Firebird. В качестве базового языка программирования используется Java, поскольку он обладает следующими преимуществами: поддерживает современные технологии объектно-ориентированного, компонентного и функционального программирования; имеет встроенную поддержку технологий метапрограммирования; обладает широким набором технологий и средств для обеспечения распределенных и параллельных вычислений; стандартизированная технология доступа к базам данных JDBC (Java DataBase Connectivity). Программная платформа разрабатывается с использованием исключительно свободного ПО.

Методы, предлагаемые для построения программной платформы, основаны на концепции автоматизированной разработки программного обеспечения MDE. Эта концепция получила дальнейшее развитие благодаря адаптации к задачам проектирования ИЭС и использованию онтологий и современных технологий метапрограммирования, обеспечивающих высокую гибкость динамического построения компонентов программной системы и внесения в нее необходимых изменений [36].

Этапы предлагаемой методики для проектирования ИЭС на основе ее цифрового двойника приведены на рис. 3.

Этап I предполагает построение графической модели цифрового двойника ИЭС по заданным исходным данным. Эта модель может быть представлена как совокупность графа, описывающего конфигурацию моделируемой системы, и набора



Рис. 3. Этапы методики решения задачи проектирования интегрированной энергетической системы на основе ее цифрового двойника.

графических и математических моделей, определяющих свойства ее подсистем и элементов.

Этап II предполагает создание модели вычислительной подсистемы цифрового двойника ИЭС в автоматизированном режиме на основе знаний, хранящихся в виде системы онтологий. Эта модель включает в себя следующие составляющие:

- 1) описание структур данных ИЭС и ее подсистем;
- 2) описание программных компонентов, реализующих математические модели и методы решения прикладной задачи;
- 3) граф, описывающий вычислительный процесс;
- 4) набор структур данных, описывающих входные и выходные параметры.

На этапе III выполняется автоматизированное построение вычислительной подсистемы цифрового двойника ИЭС на основе ее модели с использованием знаний, хранящихся в виде системы онтологий.

Цифровой двойник — это способ организации пространства для решения комплекса прикладных задач, включающий следующие составляющие:

- 1) компьютерную модель ИЭС (структуры данных, описывающие конфигурацию системы и свойства входящих в нее компонентов);
- 2) математический инструментарий (включая математические модели и алгоритмы);
- 3) программные компоненты (графические, системные, прикладные математические, типовые модели компонентов подсистем ИЭС), интегрированные в единый программный комплекс;
- 4) интерактивный графический интерфейс пользователя, включающий графическую компьютерную модель;
- 5) систему хранения данных, содержащую данные о характеристиках системы и ее элементов в различные моменты времени;
- 6) систему обмена данными с внешней средой.

Построение цифрового двойника представляет собой автоматизированную интеграцию его перечисленных компонентов в единое информационное пространство. Основой для автоматизированного построения цифрового двойника является концепция MDE. Особенностью реализации этой концепции в рамках разработанного подхода является широкое использование современных технологий метапрограммирования [37, 38], которые обеспечивают высокую гибкость для динамической интеграции компонентов программной системы и внесения в нее необходимых изменений.

Этап IV включает в себя компьютерное и математическое моделирование ИЭС с использованием мультиагентного подхода [30], математических моделей и алгоритмов, которые реализуются в виде программных компонентов. Вычислительный процесс управляется знаниями из онтологической системы и протекает в автоматическом режиме. В результате проведения моделирования необходимо получить данные, на основе которых будут подготовлены проектные рекомендации для вновь проектируемых ИЭС или оптимизации существующих ИЭС.

На этапе V полученные проектные рекомендации реализуются на практике при построении или развитии ИЭС.

Этап VI предусматривает сбор данных о характеристиках ИЭС в процессе их эксплуатации в различные периоды времени. Далее осуществляется переход к этапу I для доработки графической модели цифрового двойника ИЭС с использованием собранных данных.

Предложены принципы вычислительного процесса, основанного на мультиагентном подходе. Данный вычислительный процесс позволяет моделировать изменение динамики развития и функционирования ИЭС во времени с учетом большого числа центров принятия решений по поставкам различных видов энергии с возможностью перехода с одного вида на другой. В соответствии с предложенными принципами объекты в ИЭС делятся на три группы: потребители, сети и источники энергии. Каждый объект представлен своим агентом, который отражает его поведение в системе, связи с другими агентами, характеристики, параметры и индивидуальные ограничения. Иерархия взаимодействия между агентами описывается тремя уровнями (рис. 4). На первом уровне (уровень разработки) находится агент разработки и его вспомогательные локальные агенты (агент разработки источников энергии, агент разработки сети, агент построения диаграмм).

Агенты уровня разработки подготавливают данные для расчетной схемы, генерируют схему ИЭС и отправляют необходимые данные на уровень расчета, затем анализируют полученные данные и генерируют решение для построения ИЭС. Они также выводят статистику в виде графиков и диаграмм на экран пользователей. Второй и третий уровни функционирования объектов совмещены на расчетном уровне. На втором уровне функционируют агенты-координаторы: сетевой агент централизованной системы и сетевые агенты распределенных подсистем. Сетевой агент централизованной системы координирует и контролирует формирование решения для объектов централизованной генерации. Он обменивается информацией с агентом разработки и сетевыми агентами распределенных подсистем. Распределенные

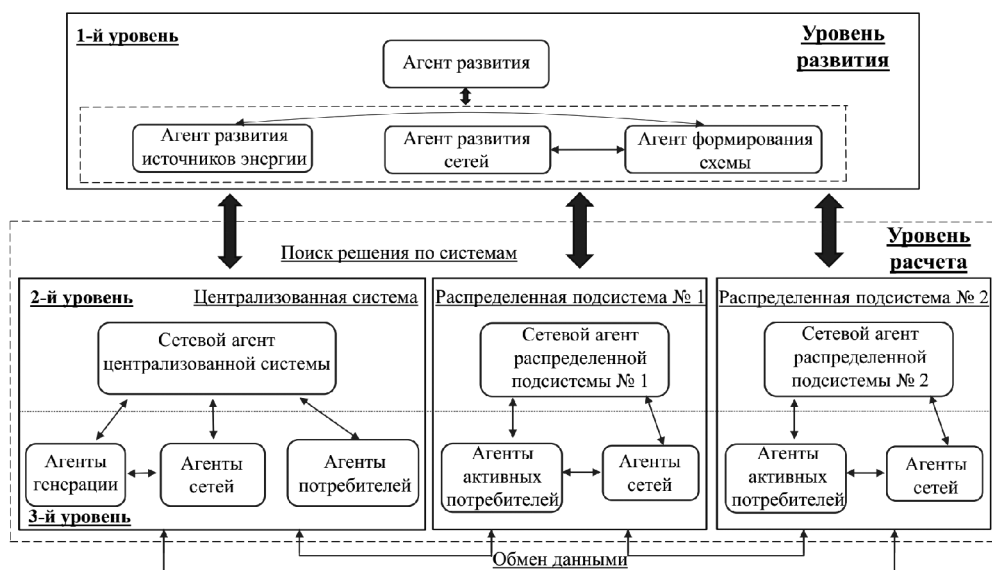


Рис. 4. Структура мультиагентной системы.

Она включает в себя следующие составляющие: обычные и активные потребители, электростанции, фотоэлектрические системы, линии электропередачи, тепломагистраль, газоматриаль, источники электрической и тепловой энергии, газораспределительная станция.

Задача разработки моделируемой ИЭС решается с помощью разработанных программных компонентов. Эти программные компоненты динамически интегрируются в единый вычислительный процесс на основе знаний из онтологий. Взаимодействие агентов и программных компонентов, используемых в мультиагентной системе, позволило получить оптимальное решение, на основе которого были определены и реализованы необходимые мероприятия по строительству сети и генерирующих мощностей. Визуальное представление полученного решения приведено на рис. 6. Результаты расчетов представлены в табл. 1, 2 и 3. Проведенный вычислительный эксперимент свидетельствует о возможности использования цифрового двойника для решения задачи разработки ИЭС.

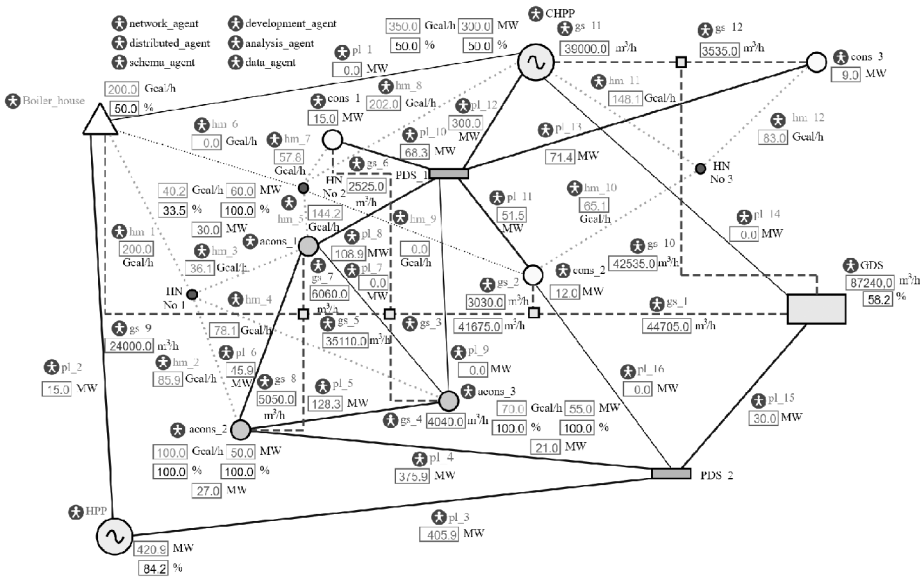


Рис. 6. Результаты расчета интегрированной энергосистемы.

Таблица 1. Результаты расчетов по источникам энергии

Имя	Выработка тепла, Гкал/ч	Выработка электр., МВт	Снабжение газом, м³/ч	Загруженность, %
ТЭЦ	350.0	300.0	—	50.0
ГЭС	—	420.9	—	84.2
Котельная	200.0	—	—	50.0
ГРС	—	—	87240.0	58.2

Таблица 2. Результаты расчетов для активных потребителей

Имя	Электр. нагрузка, МВт	Тепл. нагрузка, Гкал/ч	Газ. нагрузка, м ³	Холод. нагрузка, МВт	Выработ- ка тепла, Гкал/ч	Выработка электр., МВт	Выработка холода, МВт
Активный потребитель № 1	150.0	180.0	6000.0	30.0	40.2	60.0	30.0
Активный потребитель № 2	120.0	150.0	5000.0	27.0	100.0	50.0	27.0
Активный потребитель № 3	90.0	120.0	4000.0	21.0	70.0	55.0	21.0

Таблица 3. Результаты расчетов для участков сети

Имя ЛЭП	Передача электр., МВт	Имя ТМ	Передача тепла, Гкал/ч	Имя ГМ	Расход газа, м ³ /ч
ЛЭП № 1	0.0	ТМ № 1	200.0	ГМ № 1	44705.0
ЛЭП № 2	15.0	ТМ № 2	85.9	ГМ № 2	3030.0
ЛЭП № 3	405.9	ТМ № 3	36.1	ГМ № 3	41675.0
ЛЭП № 4	375.9	ТМ № 4	78.1	ГМ № 4	4040.0
ЛЭП № 5	128.3	ТМ № 5	144.2	ГМ № 5	35110.0
ЛЭП № 6	45.9	ТМ № 6	0.0	ГМ № 6	2525.0
ЛЭП № 7	0.0	ТМ № 7	57.8	ГМ № 7	6060.0
ЛЭП № 8	108.9	ТМ № 8	202.0	ГМ № 8	5050.0
ЛЭП № 9	0.0	ТМ № 9	0.0	ГМ № 9	24000.0
ЛЭП № 10	68.3	ТМ № 10	65.1	ГМ № 10	42535.0
ЛЭП № 11	51.5	ТМ № 11	148.1	ГМ № 11	39000.0
ЛЭП № 12	300.0	ТМ № 12	83.0	ГМ № 12	3535.0
ЛЭП № 13	71.4	—	—	—	—
ЛЭП № 14	0.0	—	—	—	—
ЛЭП № 15	30.0	—	—	—	—
ЛЭП № 16	0.0	—	—	—	—

Затраты на энергоснабжение потребителей при найденной конфигурации ИЭС представлены на рис. 7. Для трех потребителей приведены значения затрат на электроснабжение, теплоснабжение и газоснабжение (затраты на охлаждение включены в затраты на электро- и теплоснабжение). Суммарные затраты на энергоснабжение

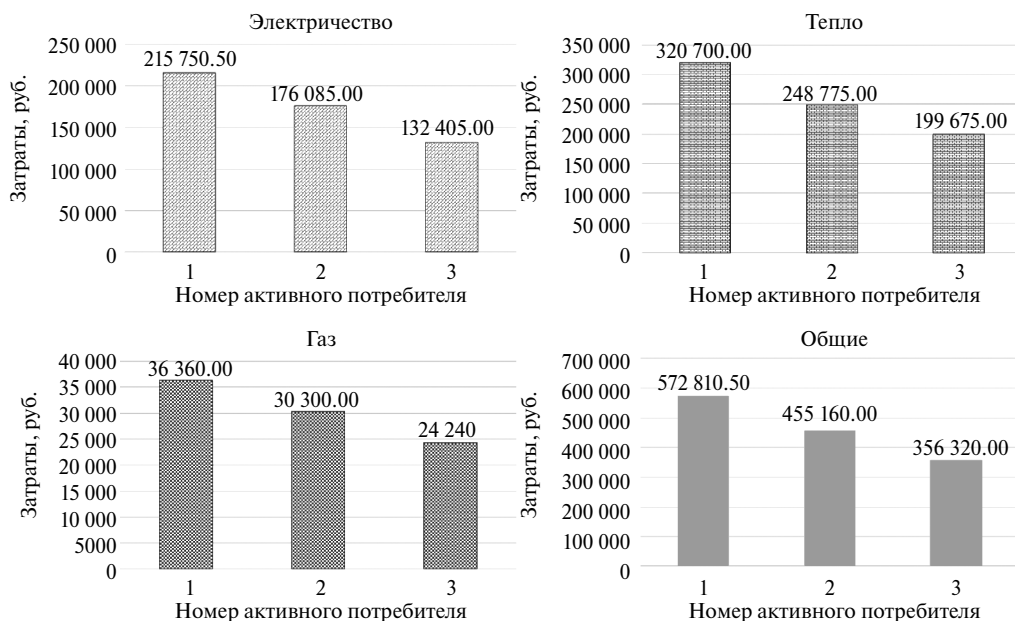


Рис. 7. Затраты на энергоснабжение активных потребителей.

для первого потребителя составили 572810.5 руб., для второго – 455160 руб., а для третьего – 356320 руб. Общая сумма затрат на энергоснабжение для трех потребителей составила 1384290.5 руб.

ВЫВОДЫ

Интегрированные энергетические системы приобретают все большее значение в связи с их высокой значимостью для промышленности и коммунального хозяйства. В современных условиях оптимальное проектирование этих систем, имеющее научное, инженерное и экономическое обоснование, становится все более актуальным. Проектирование ИЭС представляет собой сложную задачу, что обусловлено сложной конфигурацией этих систем, широким спектром используемого оборудования и разнообразным набором математических моделей и специализированного ПО, используемого для его моделирования. Использование цифровых двойников позволяет эффективно исследовать различные по своей структуре и конфигурации системы, моделируя их в виртуальном пространстве, что позволяет создавать более эффективные проектные решения.

В данной работе предложены принципы построения цифровых двойников для проектирования ИЭС. Эти принципы использованы для разработки методического подхода к проектированию ИЭС на основе ее цифрового двойника. В рамках этого подхода разработана архитектура программной платформы для создания цифровых двойников. Предложен набор современных технологий и инструментов для реализации программной платформы. Разработаны методы автоматизированного построения вычислительной подсистемы цифрового двойника на основе концепции MDE с учетом конструктивных особенностей ИЭС. Реализация MDE

использует формализованные знания в виде онтологий и современные технологии метапрограммирования. Разработана новая методика для решения задачи проектирования ИЭС на основе ее цифрового двойника. Предложены принципы организации вычислительного процесса с использованием мультиагентного подхода, позволяющие осуществлять выбор конфигурации и параметров оборудования ИЭС с учетом динамики изменения характеристик ее подсистем и элементов.

Результаты, полученные в процессе исследования ИЭС с использованием программной реализации компонентов цифрового двойника ИЭС, свидетельствуют о работоспособности разработанного методического и программного обеспечения. Проведенные исследования с привлечением цифрового двойника позволили построить оптимальную схему ИЭС для энергоснабжения потребителей с учетом системных условий и ограничений.

Разработанное методическое обеспечение может быть использовано научно-исследовательскими, проектными и эксплуатационными организациями, занимающимися проектированием и развитием ИЭС. Его применение позволяет повысить эффективность процесса проектирования, улучшить качество получаемого проектного решения, а также автоматизировать трудоемкие вычислительные операции, выполняемые при выборе параметров и конфигурации проектируемой 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. *Stennikov V., Barakhtenko E., Sokolov D., Zhou B.* Current state of research on the energy management and expansion planning of integrated energy systems // *Energy Reports*, 2022. V. 8. P. 10025–10036.
2. *Voropai N.I., Stennikov V.A., Barakhtenko E.A.* Integrated energy systems: Challenges, trends, philosophy // *Studies on Russian Economic Development*, 2017. V. 28. P. 492–499.
3. *Gelernter D.* Mirror Worlds: Or the Day Software Puts the Universe in a Shoebox. How It Will Happen and What It Will Mean / Oxford University Press: Oxford, UK, 1993.
4. *Lim K.Y.H., Zheng P., Chen C.* A state-of-the-art survey of Digital Twin: Techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives // *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2020. V. 31. P. 1313–1337.
5. *Pileggi P., Verriet J., Broekhuijsen J., van Leeuwen C., Wijbrandi W., Konsman M.* A Digital Twin for Cyber-Physical Energy Systems // In *Proceedings of the 7th Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems*, Montreal, QC, Canada, 5–15 April 2019; IEEE: New York, NY, USA, 2019.
6. *Zambrano V., Mueller-Roemer J., Sandberg M., Talasila P., Zanin D., Larsen P.G., Loeschner E., Thronicke W., Pietraroia D., Landolfi G., et al.* Industrial digitalization in the industry 4.0 era: Classification, reuse and authoring of digital models on Digital Twin platforms // *Array*, 2022. V. 14. 100176.
7. *Katsidoniotaki E., Psarommatis F., Göteman M.* Digital Twin for the Prediction of Extreme Loads on a Wave Energy Conversion System // *Energies*, 2022. V. 15. № 15. 5464.
8. *Agostinelli S., Cumo F., Guidi G., Tomazzoli C.* Cyber-Physical Systems Improving Building Energy Management: Digital Twin and Artificial Intelligence // *Energies*, 2021. V. 14. № 8. 2338.

9. *Bányai Á., Bányai T.* Real-Time Maintenance Policy Optimization in Manufacturing Systems: An Energy Efficiency and Emission-Based Approach // *Sustainability*, 2022. V. 14. № 17. 10725.
10. *Fathy Y., Jaber M., Nadeem Z.* Digital Twin-Driven Decision Making and Planning for Energy Consumption // *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2021. V. 10. № 2. 37.
11. *Henzel J., Wróbel Ł., Fice M., Sikora M.* Energy Consumption Forecasting for the Digital-Twin Model of the Building // *Energies*, 2022. V. 15. № 12. 4318.
12. *You M., Wang Q., Sun H., Castro I., Jiang J.* Digital twins based day-ahead integrated energy system scheduling under load and renewable energy uncertainties // *Applied Energy*, 2022. V. 305. 117899.
13. *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.
14. *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.
15. *Kasper L., Birkelbach F., Schwarzmayer 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.
16. *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.
17. *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 Guangyang 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.
18. *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.
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.
24. *Массель Л.В., Ворозжцова Т.Н.* Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики // *Онтология проектирования*, 2020. Т. 10. № 3(37). С. 327–337.
25. *Azure Digital Twins [Электронный ресурс].* URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/digital-twins/> (дата обращения: 01.09.2022).

26. GE, PREDIX [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin> (дата обращения: 01.09.2022).
27. Power Analytics [Электронный ресурс]. URL: <https://www.poweranalytics.com/paladin-software/> (дата обращения: 01.09.2022).
28. ABB, ABBAbility [Электронный ресурс]. URL: <https://new.abb.com/abb-ability/ru> (дата обращения: 01.09.2022).
29. Хасилев В.Я. Элементы теории гидравлических цепей // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1964, № 1. С. 69–88.
30. 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. V. 309. 118487.
31. Yorke R. Electric Circuit Theory / Pergamon Press, Oxford, UK, 1981.
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.
33. Silva da A.R. Model-driven engineering: A survey supported by the unified conceptual model // Computer Languages, Systems & Structures, 2015. V. 43. 139–155.
34. Gruber T.R. A translation approach to portable ontology specifications // Knowledge Acquisition, 1993. V. 5. № 2. 199–220.
35. Staab S., Studer R. Handbook on Ontologies, 2nd ed. / Springer-Verlag: Heidelberg, Germany, 2009.
36. 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.
37. Hazzard K., Bock J. Metaprogramming in .NET / Manning Publications: Shelter Island, NY, USA, 2013.
38. Lämmel R. Software Languages: Syntax, Semantics, and Metaprogramming / Springer: Cham, Switzerland, 2018.

Design of Integrated Energy Systems Based on Their Digital Twins

V. A. Stennikov^a, E. A. Barakhtenko^{a,*}, D. V. Sokolov^a, G. S. Mayorov^a

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

^{*}*e-mail: barakhtenko@isem.irk.ru*

Design of integrated energy system (IES) is a complex problem, which is caused by the complex network configuration of these systems, a wide range of used equipment and mathematical models of IES subsystems. The digital twin allows one to model in virtual space various configurations of IES and to obtain the optimal variant of construction of the system under study. The paper proposes the principles of digital twin for design of IES. The authors present a methodological approach to the design of IES on the basis of its digital twin. The results of modelling of the energy supply system obtained on the software implementation of the components of the digital twin of the IES are presented.

Keywords: integrated energy system, digital twin, automation of programming, software platform, energy system design