

Методы, технологии и приложения искусственного интеллекта

УДК 004.8:620.9

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.003

Методы построения умных цифровых двойников для проектирования возобновляемых источников энергии

Массель Людмила Васильевна, Цыбиков Алексей Ринчинович, Щукин Никита Игоревич

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск, tsibikow@mail.ru

Аннотация. В контексте глобального перехода к низкоуглеродной экономике проектирование объектов возобновляемой энергетики (ВИЭ), таких, как солнечные и ветровые электростанции, требует учета множества сложно прогнозируемых факторов: изменчивости природных ресурсов, рельефа местности, экологических ограничений и экономических параметров. Цифровые двойники (ЦД) представляют собой мощный инструмент для решения этих задач, обеспечивая виртуальное представление физического объекта на всех этапах его жизненного цикла. В статье рассматриваются предлагаемые методы построения умных цифровых двойников (Smart Digital Twin, SDT) используемых при проектировании объектов возобновляемой энергетики. В качестве основы предлагается модифицированная модель цифрового двойника, фундаментом которой служат онтологические модели. Эти модели формализуют ключевые понятия, сущности и их атрибуты в предметной области возобновляемой энергетики, а также семантические отношения между ними. Онтология обеспечивает единый глоссарий и структуру данных, что критически важно для интеграции разнородных информационных источников и обеспечения взаимопонимания между компонентами системы и специалистами. На следующем этапе описывается её дальнейшее преобразование в модель умного цифрового двойника добавлением интеллектуальных компонентов, таких, как базы знаний, виртуальная среда, модели искусственного интеллекта, схемы и диаграммы. Для описания связей между моделями и компонентами предложено использование фрактальной стратифицированной модели, формализующей структуру знаний и взаимосвязи между онтологическими, информационными и математическими моделями. Подробно описана методика онтологического инжиниринга, адаптированная для задач проектирования цифровых двойников, и метод построения виртуальной среды, позволяющей выполнять отладку, как цифровых двойников, так и умных цифровых двойников в условиях отсутствия постоянной связи с реальным объектом или полного отсутствия реального объекта. Для эмуляции внешних параметров, таких, как погодные условия, предложен модифицированный процесс на основе *CRISP-DM*, обеспечивающий интеграцию моделей машинного обучения. Практическая значимость подхода подтверждена разработкой компонента визуализации для нахождения места оптимального размещения электростанции и её проектирования, использующего интерактивную 3D-модель Земли, спутниковые данные и метеорологические API. Реализованный инструмент демонстрирует возможность проектирования объектов возобновляемой энергетики.

Ключевые слова: цифровой двойник, умный цифровой двойник, возобновляемые источники энергии, фрактальная стратифицированная модель, онтология, машинное обучение, визуализация

Цитирование: Массель Л.В. Методы построения умных цифровых двойников для проектирования возобновляемых источников энергии / Л.В. Массель, А.Р. Цыбиков, Н.И. Щукин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1(41). – С. 43-58 – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.003.

Введение. С развитием информационных технологий в начале 2000-х годов, концепция цифровых двойников начала активно развиваться. Майкл Гривз из Мичиганского университета предложил идею “цифрового двойника” в контексте управления жизненным циклом продукта [1]. Эта концепция включала в себя реальное и виртуальное пространство, а также механизм обмена информацией между ними.

Современная энергетика переживает трансформацию, связанную с введением в эксплуатацию возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Проектирование систем ВИЭ осложнено стохастическим характером генерации и необходимостью обеспечения

надежности энергосистем. В этих условиях актуализируется поиск новых инструментов, способных оперативно наблюдать, прогнозировать и управлять работоспособностью объектов, среди таких инструментов концепция цифровых двойников (ЦД) занимает ключевое место [2, 3]. В Российской Федерации предложен стандарт для построения цифровых двойников: в 2021 г. принят ГОСТ Р 57700.37 – 2021. «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий». Несмотря на то, что он ориентирован преимущественно на изделия машиностроения, основными его положениями можно руководствоваться и при построении ЦД в энергетике [4].

Применение онтологических моделей в архитектуре цифрового двойника способствует достижению семантической согласованности его компонентов. Такой подход позволяет формализовать структурные и функциональные взаимосвязи элементов моделируемой системы, что минимизирует неоднозначность интерпретации данных и обеспечивает условия для интеграции гетерогенных источников информации [5, 6].

Проектирование архитектуры цифрового двойника энергетической системы требует комплексного подхода, охватывающего вопросы как организации информационного обеспечения, так и разработки математического аппарата. Как отмечается в [7], ключевым аспектом является создание структурированной системы сбора, обработки и хранения данных, обеспечивающей достоверность и своевременность информационных потоков.

Дальнейшее развитие математического обеспечения цифровых двойников связано с внедрением методов искусственного интеллекта. В частности, в [8] обосновывается эффективность применения нейронных сетей глубокого обучения для решения задач прогнозирования режимных параметров и идентификации состояний энергосистемы.

Согласно ГОСТ, цифровой двойник – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями [4]. Цифровой двойник получает через информационную связь данные об изделии: рабочие параметры, текущее состояние, условия эксплуатации, режим работы оборудования и историю операций. Анализируя эту информацию, ЦД формирует рекомендации по обслуживанию, выявляет уязвимости и потенциальные риски, что способствует снижению аварийности и отказов. По каналу обратной связи от ЦД передаются управляющие команды на моделируемый объект.

В коллективе, который представляют авторы, предложена модель ЦД [9]. Авторами выполнена ее модификация с учетом предложенного онтологического подхода к построению ЦД. Для отладки ЦД, в отсутствие постоянного канала связи с энергетическим объектом, предложено построение виртуальной среды, сформулированы принципы ее построения. При нахождении оптимального места размещения и проектировании ВЭС предлагается использовать визуализацию. Для прогнозирования погодных характеристик ВЭС используется машинное обучение. Таким образом, в качестве основных методов разработки ЦД предлагается использовать, с учетом предложенных моделей, рассмотренные ниже методы онтологического инжиниринга, машинного обучения, построения виртуальной среды и визуализации.

Модель цифрового двойника. Авторами в работе [9] предложена и описана формализованная модель цифрового двойника (*DT*):

$$DT = (IM, MM, DB, VT, SE, RC), \quad (1)$$

где *IM* – информационные модели; *MM* – математические модели; *DB* – базы данных; *VT* – средства визуализации, *SE* – необходимые сервисные компоненты; *RC* – средства связи между компонентами в режиме реального времени.

В связи с развитием онтологического подхода авторами предложена модификация базовой модели, дополненная онтологическими моделями и отношениями между ними. Это

позволяет построить единое онтологическое пространство, обеспечивающее мета-описание и согласованность рассматриваемых компонентов. Модифицированная модель имеет вид:

$$DT = (IM, MM, DB, VT, SE, RC, OM, ROM, ROMIM, ROMMM), \quad (2)$$

где OM – множество онтологических моделей; $ROM \subset OM_i \times OM_k$ – множество отношений между онтологическими моделями, определяет архитектуру построения онтологических моделей, где $\forall i \forall k OM_i \neq OM_k$; $ROMIM \subset OM \times IM$ – множество отношений между онтологическими моделями и информационными моделями, определяет связи онтологических моделей с информационными, давая мета-описание информационных моделей с использованием онтологических; $ROMMM \subset OM \times MM$ – множество отношений между онтологическими моделями и математическими моделями, определяет связи онтологических моделей с математическими, давая мета-описание математических моделей с использованием онтологических.

Для структурирования и формализации знаний в работе используются онтологии, которые необходимо корректно связывать между собой (ROM), чтобы они поддерживали разработку DT , а не замедляли её, для перехода от разрозненных онтологий к общему онтологическому пространству исследований. Для решения этой задачи используется фрактальный подход к структурированию знаний, который был предложен и развит в работах Л. В. Массель [10, 11].

Основой подхода является построение фрактальной стратифицированной модели (ФС-модели) информационного пространства, которую графически можно представить в виде совокупности вложенных сферических оболочек (слоев), каждый из которых объединяет множество однотипных информационных объектов, и, в свою очередь, может быть расслоен. Поскольку рассматриваемая предметная область – один из фрагментов информационного пространства, его можно представить в виде вырезки (например, конуса), в котором выделены рассматриваемые слои. Фрактальный подход предусматривает возможность отображения любого слоя в каждый, но в примерах приводятся не все отображения.

Отображения поддерживаются формализованной моделью DT , которая определяет связи между описываемыми моделями (рис. 1). С использованием ФС-модели, введенные выше отношения могут быть реализованы отображениями слоев ФС-модели, представленными как:

$$D = \{D_o, D_i, D_m\} \quad (3)$$

где D_o – слой знаний об онтологических моделях, D_i – слой знаний об информационных моделях, D_m – слой знаний о математических моделях.

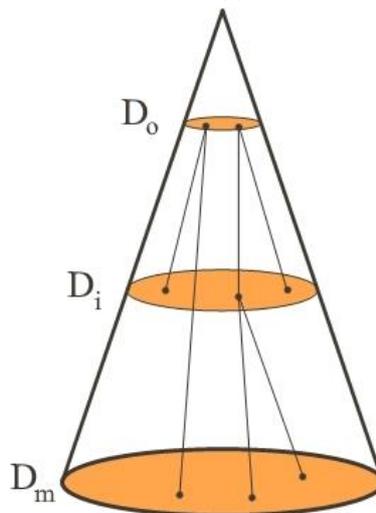


Рис. 1. Слои ФС-модели

Согласно концепции ФС-модели, можно построить отображения из любого слоя в каждый (рис. 1): $F_i^o: D_o \rightarrow D_i$ – отображение из слоя онтологических моделей в слой информационных моделей SDT , $F_m^i: D_i \rightarrow D_m$ – отображение из слоя информационных моделей в слой математических моделей, $F_m^o: D_o \rightarrow D_m$ – отображение из слоя онтологических моделей в слой математических моделей.

Слои реализуются с использованием моделей представления знаний (баз знаний), а отображения поддерживаются инструментальными средствами, обеспечивающими переход от одной модели представления знаний к другой.

Далее авторами предлагается формализованная модель умного цифрового двойника (SDT), путем добавления в модифицированную модель DT интеллектуальных технологий:

$$SDT = (IM, MM, DB, VT, SE, RC, ROM, ROMIM, ROMMM, KB, VS, AIM, SD), \quad (4)$$

где KB – базы знаний, VS – виртуальная среда, AIM – модели искусственного интеллекта, SD – схемы и диаграммы.

В контексте разработки SDT возобновляемых источников энергии, интеграция баз знаний является предпосылкой, обеспечивающей SDT способность к интеллектуальному анализу и принятию решений. Базы знаний выступают в качестве структурированного хранилища, содержащего не только фактические данные об объекте, но и экспертные правила, семантические связи, а также формализованные знания о предметной области. Их ключевая роль заключается в обеспечении SDT возможностью интерпретировать данные, выявлять закономерности и генерировать выводы, что значительно расширяет его функциональность по сравнению с традиционными подходами. Подробное описание виртуальной среды приводится в разделе ниже.

В свою очередь, также предлагается описание моделей искусственного интеллекта и потенциального взаимодействия этих моделей с SDT при помощи ФС-модели. Слои моделей искусственного интеллекта для SDT могут быть представлены, как:

$$AIM = (SM, ES, ML), \quad (4)$$

где AIM – модели искусственного интеллекта, SM – семантические модели, ES – экспертные системы, ML – модели машинного обучения.

Таким образом, для интеграции интеллектуальных технологий в SDT выделены три слоя: слой моделей машинного обучения, слой моделей представления знаний в экспертных системах и слой семантических моделей. Необходимая часть (сектор информационного пространства) для SDT представляется конусом, в котором выделены эти слои (рис. 2), и описывается отображение слоев, где D_{ES} – слой экспертных системами, D_{SM} – слой семантических моделей, D_{ML} – слой моделей машинного обучения.

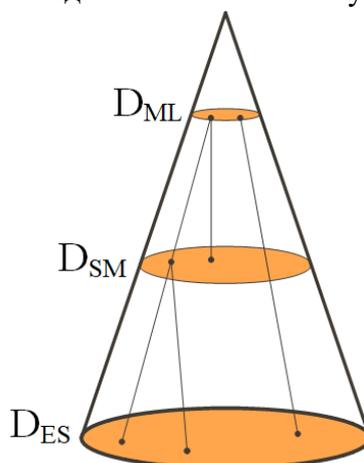


Рис. 2. Фрактальная стратифицированная модель интеллектуальных технологий в составе умного цифрового двойника

Согласно концепции ФС – модели, можно построить отображения (рис. 2):

$F_{SM}^{ML}: D_{ML} \rightarrow D_{SM}$ – отображение из слоя моделей машинного обучения в слой семантических моделей,

$F_{ES}^{ML}: D_{ML} \rightarrow D_{ES}$ – отображение из слоя моделей машинного обучения в слой экспертных систем,

$F_{ES}^{SM}: D_{SM} \rightarrow D_{ES}$ – отображение из слоя семантических моделей в слой экспертных систем.

Методика онтологического инжиниринга для построения ЦД. В статье «онтология» понимается, согласно ГОСТ Р ИСО/МЭК 21838-1-2021 «Информационные технологии. Онтологии высшего уровня» – как совокупность терминов, выражений отношения и связанных с ними определений на естественном языке вместе с одной или несколькими формальными теориями, предназначенными для отражения заданных интерпретаций этих определений [12]. Основу онтологического инжиниринга составляет четырехшаговый алгоритм [13], описанный ниже:

Шаг 1. Цели, стратегия и идентификация границ – определение цели онтологии и потребностей в приобретении знаний в предметной области. Далее необходимо определить область действия или «границы» онтологии и тип онтологии, прежде чем перейти к шагу 2.

Шаг 2. Разработка глоссария или определение мета-концепции – необходимо собрать всю информацию, относящуюся к описываемой области. Основная цель этого шага – отбор и вербализация всех основных объектов и понятий в области.

Шаг 3. Распределение по категориям, включая классификацию и спецификацию. Целью этапа является определение всех основных объектов и концепций предметной области (основных уровней абстракции). Выявление структурированной иерархии является одной из основных целей на данном этапе.

Шаг 4. Уточнение – последний шаг посвящен обновлению визуальной структуры путем исключения любых излишеств, синонимии и противоречий. Главная цель данного шага – создать правильную (“красивую”) онтологию.

Для выполнения онтологического инжиниринга области построения цифрового двойника предложено использовать его, применяя авторскую методику онтологического инжиниринга для проектирования цифровых двойников [14], включающую следующие этапы:

1. Построение системы онтологий области исследования рассматриваемого объекта и интеграция её в пространство знаний онтологий, которые описывают те объекты, в которые входит исследуемый объект и которые могут на него влиять. На этом этапе формализуются знания в области исследования и определяются ограничения, а также иерархия (система) онтологий.
2. Сбор всей необходимой информации об исследуемом объекте, отбор и вербализация основных объектов и понятий. В результате этого этапа будут построены онтологии, детально описывающие исследуемый объект.
3. Уточнение и формализация онтологий, поиск противоречий, синонимов. В результате получается формализованное онтологическое пространство, которое в дальнейшем используется для построения информационных и математических моделей и проектирования архитектуры ЦД.

Онтологии предлагается классифицировать на четыре взаимосвязанные группы онтологий, каждая из которых описывает определенную сторону объекта. На рисунке 3 представлены группы онтологий, которые необходимо построить, и связи между ними. «Онтология моделируемого объекта» описывает компоненты и связи между ними, необходимые для описания моделируемого объекта. «Онтология сопутствующих объектов»

описывает параметры системы, которые не входят в онтологию моделируемого объекта, в рамках ветровой и солнечной электростанции. Такая онтология описывает, например, погодные условия, которые влияют на моделируемые системы. При отсутствии сопутствующих объектов эта онтология не строится.

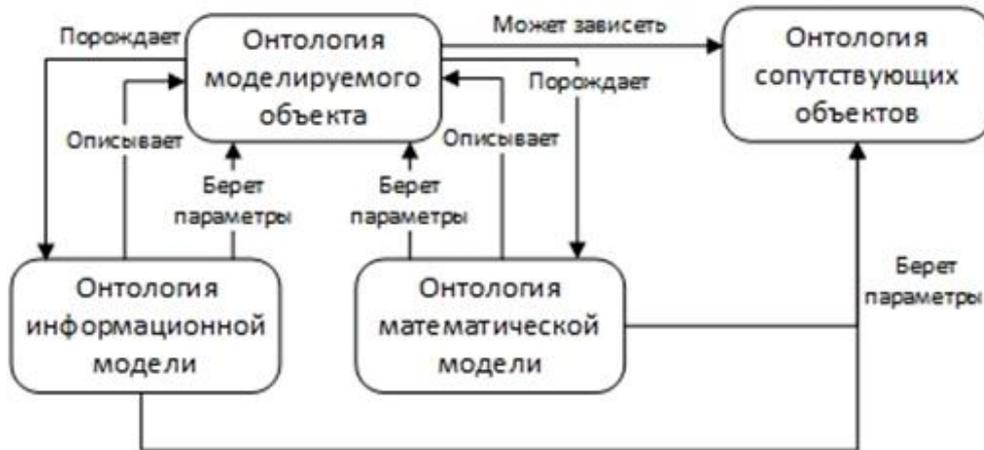


Рис. 3. Основные типы онтологий (метаонтология) ЦД и отношения между ними

Пример онтологии ветровой электростанции, которая является моделируемым объектом, представлен на рисунке 4.



Рис. 4. Онтология моделируемого объекта (ВЭС)

Построение информационных и математических моделей с использованием онтологий. «Онтология информационной модели» описывает разработанную информационную модель какой-либо части моделируемого объекта и ссылается на концепты из онтологий моделируемого объекта и сопутствующих объектов для описания тех или иных параметров, используемых в информационной модели. «Онтология информационной модели» может быть, как одна, так и множество, в зависимости от потребностей моделирования. На рисунке 5 представлен пример онтологии информационной модели ВЭС. Каждый из концептов, представленных на рисунке 5, кроме концептов «owl: Thing» и «Онтология информационной модели», описывает свою таблицу в реляционной базе данных. Каждый концепт, описывающий таблицу, хранит в себе концепты, отвечающие за атрибуты в этой таблице.



Рис. 5. Онтология информационной модели (ВЭС)

«Онтология математической модели» описывает разработанную математическую модель какой-либо части моделируемого объекта и ссылается на концепты из онтологий моделируемого объекта и сопутствующих объектов для описания тех или иных параметров, используемых в математической модели. «Онтология математической модели» может быть, как одна, так и множество, в зависимости от потребностей моделирования. На рисунке 6 представлен пример онтологии математической модели ВЭС.

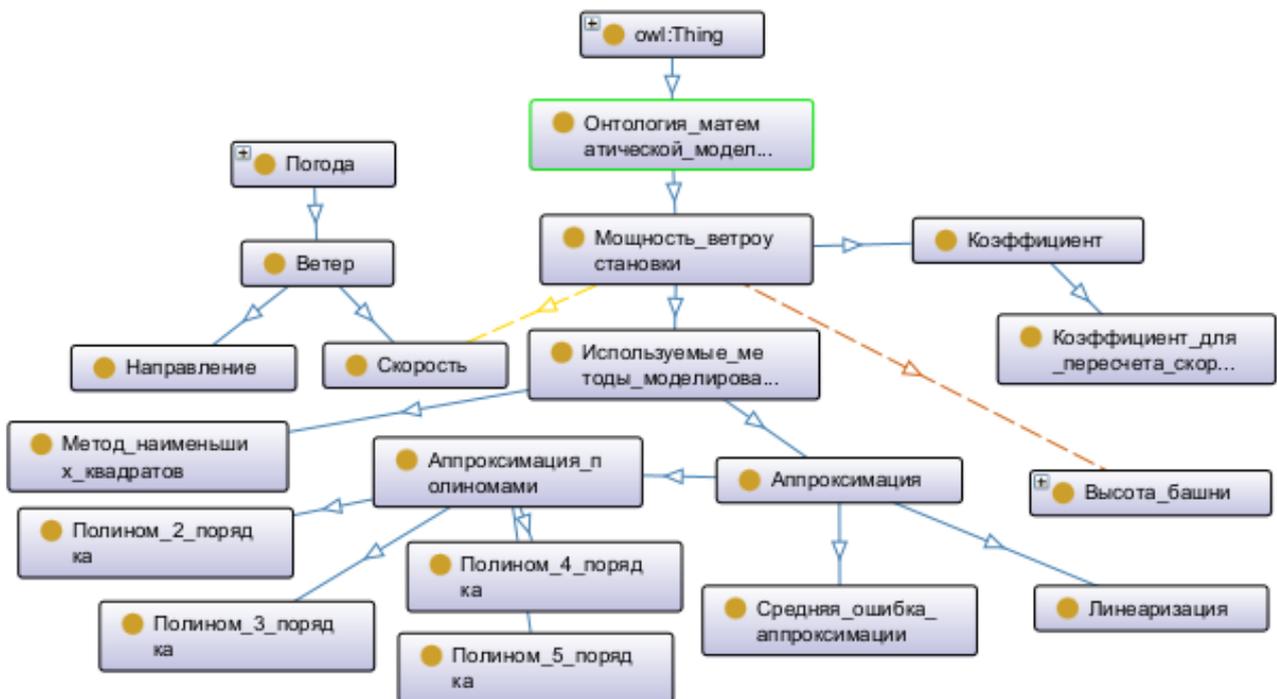


Рис. 6. Связь онтологии математической модели с онтологией моделируемого объекта (ВЭС)

Построение виртуальной среды. Взаимодействие цифрового двойника (ЦД) с реальным объектом предполагает отладку ЦД до его ввода в эксплуатацию (рис. 7).

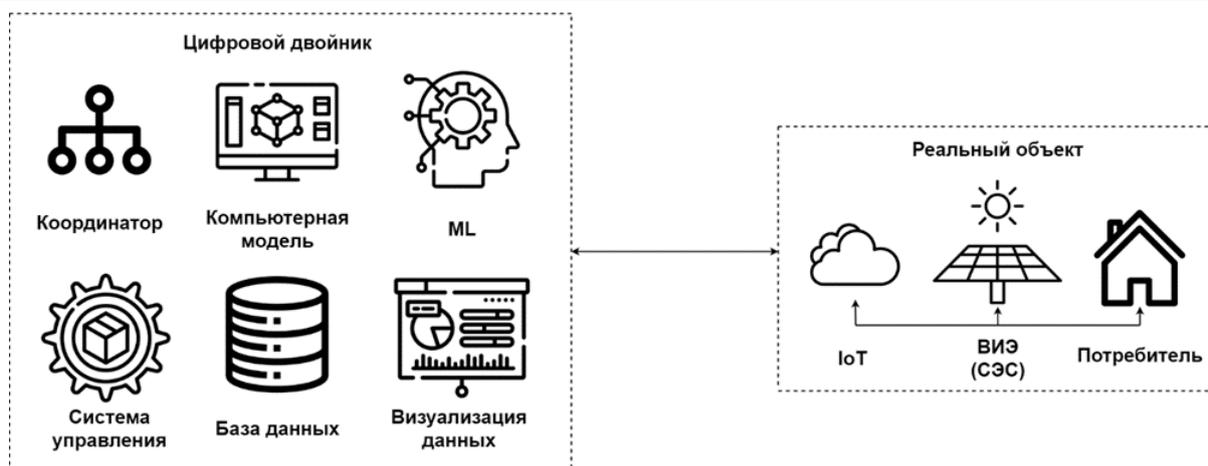


Рис. 7. Взаимодействие цифрового двойника с реальным объектом

Предлагается использовать определение виртуальной среды согласно ГОСТ Р 57721-2017 «Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Эксперимент виртуальный» [15].

Виртуальная среда – искусственная среда, созданная с использованием эмуляции и виртуализации, предназначенная для моделирования объектов и процессов реального мира. Реализация виртуальной среды происходит с помощью программного обеспечения, которое управляет визуализацией и интерактивностью.

Цифровой двойник может работать с виртуальной средой, получая симулированные физические данные из него. Симуляция поведения позволяет проводить сценарное моделирование и анализ данных (рис. 8).

Авторами выделены основные принципы построения виртуальной среды для умного цифрового двойника:

1. Построение онтологии для определения характеристик объекта.
2. Определение внешних характеристик объекта.
3. Эмуляция данных для цифрового двойника.

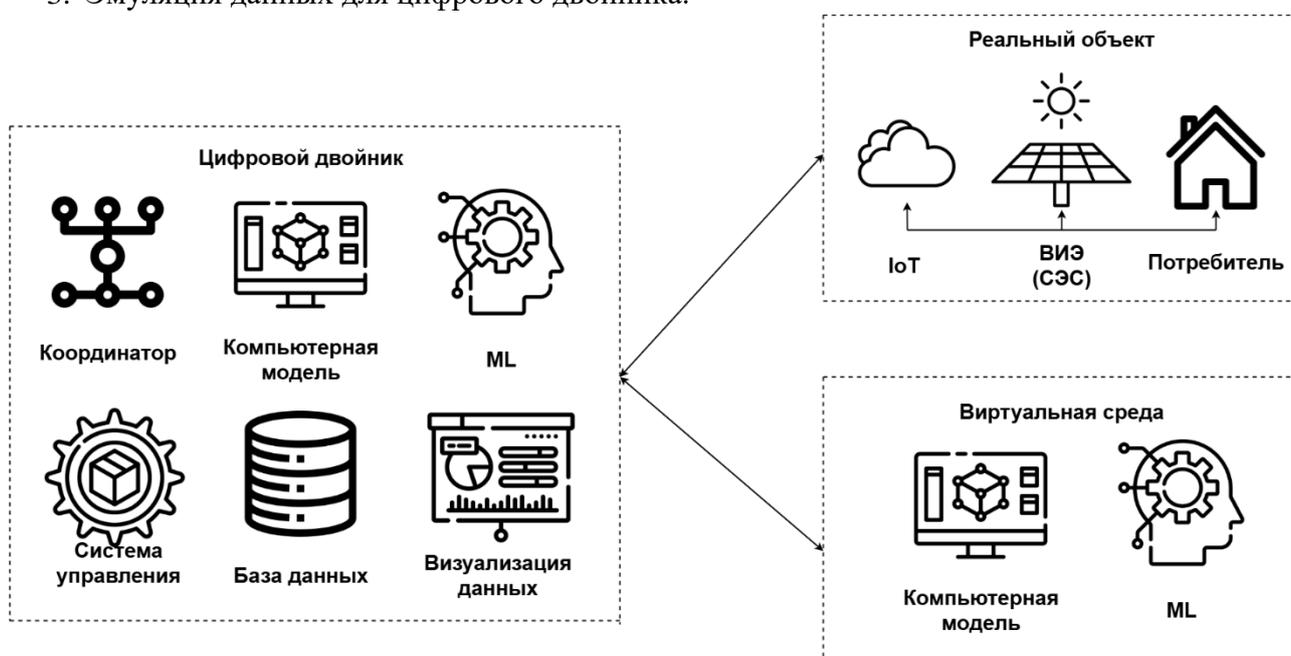


Рис. 8. Взаимодействие цифрового двойника с реальным объектом и виртуальной средой

Для работы цифрового двойника необходимы наличие входных и выходных параметров, а также информация о взаимосвязи между всеми параметрами. Для формирования

необходимых параметров при разработке виртуальной среды предлагается использовать онтологический инжиниринг, который позволяет структурировать и систематизировать данные, обеспечивая четкое понимание и представление взаимосвязей между различными аспектами модели.

Внутренние параметры представляют собой совокупность объектов и процессов, выполняющих действия внутри системы. Они описывают состояние и поведение самого объекта, а также зависят от его внутренней структуры и характеристик. Благодаря тому, что природа внутренних параметров обычно связана с физическими законами и механизмами, их можно моделировать с использованием математических методов.

Внешние параметры представляют собой условия окружающей среды, в которых находится и функционирует объект. Они описывают факторы, которые влияют на поведение объекта, но не зависят от его внутренних процессов. В отличие от внутренних параметров, внешние параметры часто носят случайный характер, что делает их моделирование более сложным.

Машинное обучение. Для эмуляции данных предлагается использовать методы машинного обучения. Эти методы способны эффективно обрабатывать и анализировать большие объемы данных, что позволяет создавать модели поведения системы. Однако для применения машинного обучения требуется наличие качественных и актуальных данных, которые будут служить основой для функционирования виртуальной среды. Эти данные могут включать историческую информацию, характеристики входных и выходных параметров, а также данные о взаимодействиях между различными элементами системы.

Важно отметить, что эффективность машинного обучения во многом зависит от качества и разнообразия используемых данных. Поэтому необходимо обеспечить предварительную обработку, очистку и агрегирование данных, чтобы они были готовы к использованию для обучения моделей. Подходящее качество данных способствует созданию точных моделей, что, в свою очередь, улучшает общую производительность цифрового двойника и его способность к адаптации в условиях динамических изменений.

Для интеграции методов машинного обучения в виртуальную среду предлагается использовать модифицированный авторами (Цыбиков А.Р.) метод на основе CRISP-DM [16] для обоснования выбора модели. Этот метод состоит из нескольких этапов:

1. Определение задач и требований к данным, которые решаются и используются в виртуальной среде при помощи методов машинного обучения, формулирование требований к оценкам качества моделей, а также определение их приоритета в зависимости от задачи, количества и качества данных.
2. Анализ данных предполагает оценку качества данных, исследование временных зависимостей и сезонности данных. Для выполнения оценки данных предлагается использовать разведочный анализ данных. Разведочный анализ данных – это процесс исследования и анализа данных с целью выявления закономерностей, паттернов, аномалий и взаимосвязей между переменными. EDA (Exploratory Data Analysis, Разведочный анализ данных) включает в себя использование различных методов и инструментов для описательной статистики, визуализации данных и построения графиков, а также применения статистических тестов и моделей для проверки гипотез и извлечения информации из набора данных.
3. Подготовка данных включает проведение основных операций над данными перед их использованием: очистка, преобразование, агрегирование, выставление признаков, нормализация и т.д. Эти шаги выполняются при необходимости.
4. Оптимизация гиперпараметров используется для выбора оптимальных гиперпараметров для обучающего алгоритма. Целевая функция, которую требуется минимизировать – это

функция потерь. Выбор функции потерь зависит от задачи, данных и метода, которые используются.

5. Обучение модели. На этом этапе выполняется непосредственное обучение выбранных на предыдущем шаге алгоритмов на подготовленных данных. Ключевой задачей является предотвращение явления «переобучения» (overfitting), при котором модель хорошо описывает обучающие данные, но плохо работает на новых, незнакомых данных. Для этого применяются: регуляризация, метод ранней остановки (EarlyStopping) и перекрестная проверка (cross-validation).
6. Оценка решения на основе метрик. После обучения проводится всесторонняя оценка качества модели на тестовой выборке, которая не участвовала в процессе обучения и настройки. Оценка выполняется на основе метрик, выбор и приоритет которых был обоснован на этапе 1.
7. Интеграция выбранной модели в виртуальную среду. После успешного прохождения оценки лучшая модель переходит на этап эксплуатации. Её интеграция в виртуальную среду предполагает: разработку программного интерфейса (API), создание конвейера (pipeline) и организацию постоянного мониторинга (MLOps).

На рисунке 9 изображен пример работы метода машинного обучения (LSTM) для прогнозирования инсоляции для виртуальной среды цифрового двойника. Модель, состоящая из трех слоев по 128 нейронов, обучалась в течение 12 эпох, общее время обучения составило 17700 секунд. Для предотвращения переобучения использовался метод ранней остановки (EarlyStopping) с мониторингом точности на протяжении 3 эпох (12). График демонстрирует сравнение фактических и прогнозируемых значений суммарной солнечной радиации, где синим цветом обозначены обучающие данные, красным – тестовые, зеленым – фактические значения и фиолетовым – значения прогноза модели.

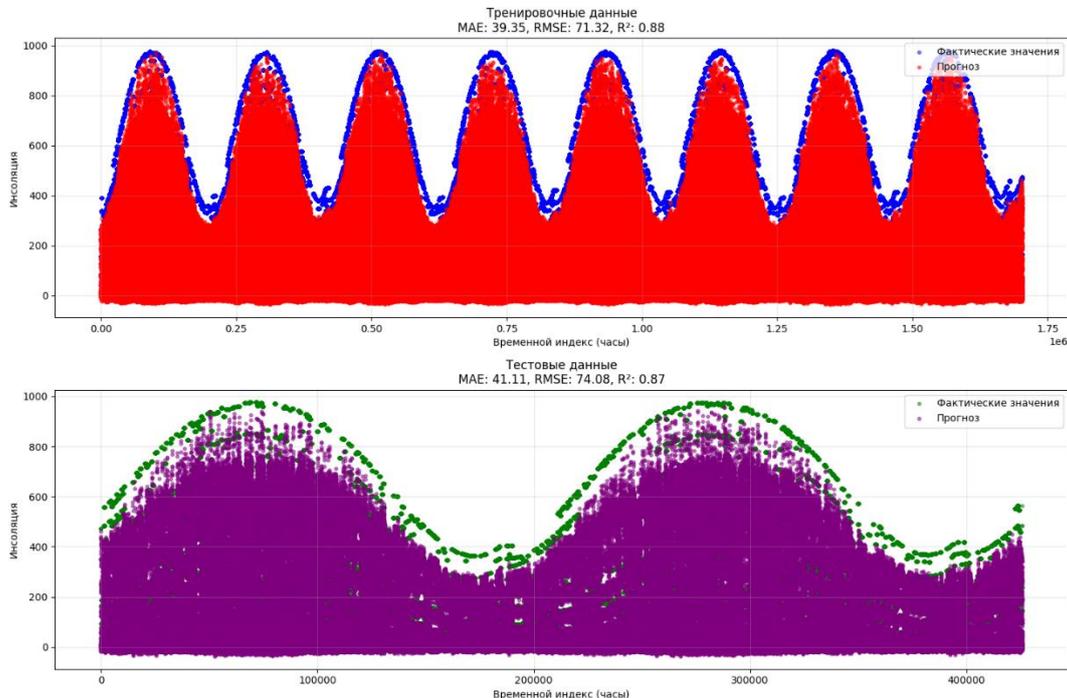


Рис. 9. Результат работы LSTM – сети

Визуализация в программном компоненте нахождения оптимального места размещения ветровой электростанции (ВЭС) и проектирования ВЭС. Программный компонент реализует авторский метод (Щукин Н.И.) обоснования размещения ветровой электростанции. Для определения оптимального места размещения ВЭУ на заданной территории применяется метод роя частиц. Основные этапы алгоритма (рис. 10):

1. Выбор жилого пункта, который необходимо обеспечить электроэнергией.
2. Выбор ветровой установки и её математической модели развиваемой мощности.
3. Задание параметров расчета: количество лет, за которые будут собираться данные о скорости ветрового потока для расчета коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) и количество отображаемых лучших найденных мест размещения: $КИУМ = \frac{P_{ср\ за\ год}}{P_{уст}} \cdot 100\%$
4. Задание области расчета (в виде круга).

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2,$$
 где x_0, y_0 – долгота и широта центра круга соответственно
5. Инициализация каждой частицы в рое начальными значениями.
 x_i = случайной точке из области расчета, где x_i – положение частицы,
 $p_i = x_i$, где p_i – лучшее положение частицы,
 $f(p_i) > f(g) \rightarrow g = p_i$, где g – лучшее положение роя, $f(x)$ – КИУМ в точке
6. v_i = случайной точке из области расчета, где v_i – скорость частицы. Расчет новых положений частиц:

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + \phi_p U(0, 1)(p_i - x_i^t) + \phi_g U(0, 1)(g - x_i^t),$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}$$
7. Сбор ретроспективных данных о скорости ветрового потока за определенный период времени в текущем положении частицы.
8. Проведение статистического анализа собранных данных для получения расчетных значений и пересчет скорости ветрового потока на высоту ветровой установки.

$$V(h) = V_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha, h_0 \neq 0$$
9. Расчет КИУМ и если:
 $f(x_i^{t+1}) > f(p_i) \rightarrow p_i = x_i^{t+1}$
 $f(p_i) > f(g) \rightarrow g = p_i$
10. То повторение пунктов 6-9 вплоть до окончания итераций алгоритма.
11. Определение количества домо-хозяйств (K) в жилом пункте и потребляемой каждым мощности (P_N)



Рис. 10. Алгоритм метода для обоснования размещения ветровой электростанции

12. Расчет общей необходимой потребляемой мощности в выбранном жилом пункте.

$$P = P_N * K.$$

13. Определение, по данным о погодных характеристиках, соотношения мощности, вырабатываемой ветровыми установками и солнечными панелями (P_S), и необходимости резервного дизель-генератора.

14. Определение количества необходимых ветровых установок (W).

$$W = \frac{P - P_S}{P_W},$$

где P_W – вырабатываемая мощность ветровой установки в найденных точках.

Для начала расчета с использованием предлагаемого программного компонента, включающего визуализацию (Щукин Н.И.) необходимо ввести начальные данные расчета (рис. 11): «Количество точек расчета» – количество лучших рассчитанных точек, которые увидит пользователь в конце расчета; «Модель для расчета» – модель, используемая для расчета в каждой точке.

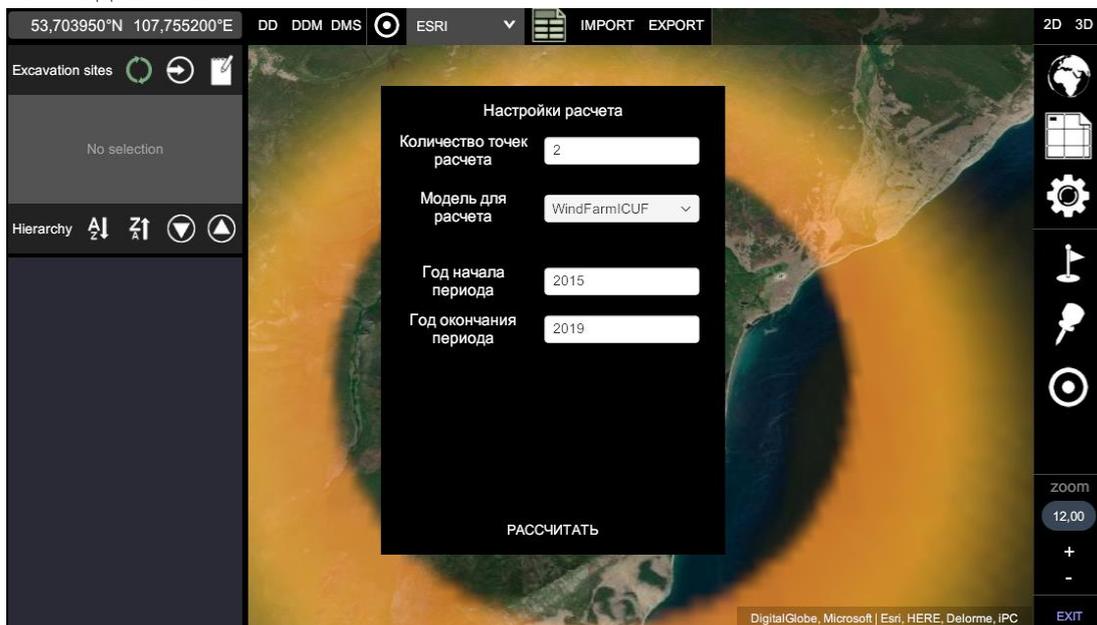


Рис. 11. Всплывающее окно с настройками расчета

Основой визуализации результатов применения предложенного метода является интерактивная модель планеты Земля, реализуемая с использованием 3D-графики (рис. 12).

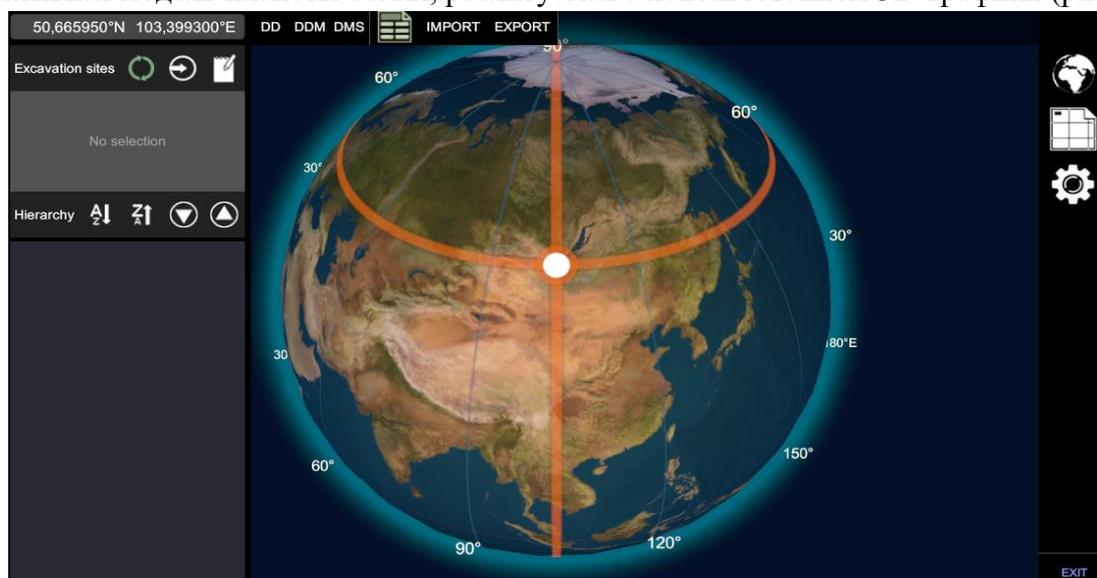


Рис. 12. Интерфейс с моделью Земли

При приближении к поверхности пользователю открывается возможность увидеть визуализацию местности, полученную через интеграцию с сервисами ESRI [17]. Снимки со спутников обеспечивают высокую степень детализации, включая топографические особенности и существующую инфраструктуру.

Процесс нахождения оптимального места размещения ВЭС начинается с установки точки для расчета в интерфейсе визуализации. Она служит отправной точкой для дальнейшего анализа условий ветра в данной местности. Важным шагом является загрузка данных о ветровых условиях по широте и долготе, которые извлекаются с помощью NASA POWER Hourly API [18]. Этот API обеспечивает доступ к актуальным и историческим метеорологическим данным, включая скорость и направление ветра, что критично для оценки потенциала ВЭС в разных местах. Возможно загружать сведения о погоде, как в реальном времени, так и выбирать определенный промежуток, что позволяет пользователю наблюдать за конкретной территорией, на которой он собирается анализировать возможность установки ВЭУ.

«Год начала периода» и «Год окончания периода» означают, в каких промежутках происходит сбор погодных характеристик. По результатам расчета появляются точки с лучшими параметрами, это демонстрирует рисунок 13.

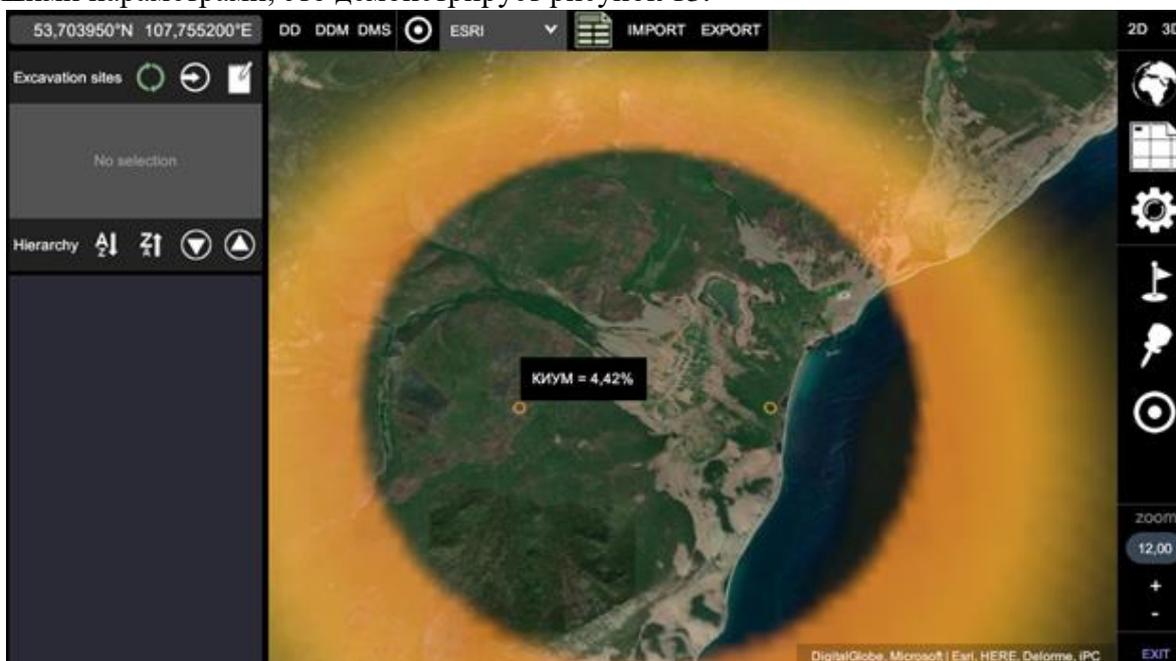


Рис. 13. Визуализация расчета

Пункты алгоритма с 9 по 11 реализуются на сцене проектирования ветровой электростанции (рис. 14). На текущий момент валидация результатов расчета выполняется с помощью экспертных оценок.



Рис. 14. Проектирование ветровой электростанции

Заключение. В статье описаны методы построения умных цифровых двойников возобновляемых источников энергии. Развитие существующей формализованной модели цифрового двойника выполняется за счет интеграции онтологических моделей и отношений между ними, а затем – путем введения интеллектуальных компонентов, таких, как базы знаний, виртуальная среда и модели искусственного интеллекта. Важная роль в обеспечении целостности и согласованности разрабатываемой системы отводится онтологическим моделям. Предложенный метод построения информационных и математических моделей с использованием онтологий обеспечивает структурирование знаний о моделируемом объекте, его окружении и связанных с ним моделях.

Важным результатом работы является метод построения и использования виртуальной среды, которая решает критическую задачу отладки и валидации ЦД в условиях отсутствия постоянной связи с реальным физическим объектом. Разработанный модифицированный метод на основе CRISP-DM для интеграции методов машинного обучения формализует создание прогнозных моделей, обеспечивающих эмуляцию стохастических внешних параметров, таких, как погодные условия. Представленный программный компонент нахождения оптимального места размещения ВЭС с визуализацией, интегрирующей интерактивную модель Земли и метеорологические API, демонстрирует прикладную ценность разработанного SDT для решения задач стратегического планирования – оптимального размещения и проектирования ВЭС.

Благодарности. Работа выполняется в рамках проекта по госзаказу ИСЭМ СО РАН, № темы FNEU-2026-0007, рег. № АААА-А26-121012090007-7.

Список источников

1. Grieves M.W. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. LLC, 2014, 7 p.
2. El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies. IEEE MultiMedia, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 87–92, DOI: 10.1109/MMUL.2018.023121167.
3. Прохоров А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, А. Лысачев А. Научный редактор проф. Боровков А.И. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с
4. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – Введ. 2022-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180928> (дата обращения: 20.11.2025).
5. Непша Ф.С. Онтология как основа для создания цифровых двойников объектов управления интеллектуальной распределенной энергетики / Ф.С. Непша, А.А. Андриевский, М.И. Красильников // Автоматизация в промышленности, 2021. – № 1. – С. 27-33. – DOI: 10.25728/avtprom.2021.01.04. – EDN ALJNLE.
6. Андриюшкевич С. К. Разработка цифрового двойника энергетической системы на основе онтологической модели / С.К. Андриюшкевич, С.П. Ковалев, Е.И. Нефедов // Автоматизация в промышленности, 2020. – № 1. – С. 51-56. – DOI: 10.25728/avtprom.2020.01.10. – EDN OHGENW.
7. Ковалев С.П. Проектирование информационного обеспечения цифровых двойников энергетических систем / С.П. Ковалев // Системы и средства информатики, 2020. – Т. 30. – № 1. – С. 66-81. – DOI: 10.14357/08696527200106. – EDN UNOOKU.
8. Ковалев С.П. Применение нейронных сетей глубокого обучения в математическом обеспечении цифровых двойников электроэнергетических систем / С.П. Ковалев // Системы и средства информатики, 2021. – Т. 31. – № 1. – С. 133-144. – DOI: 10.14357/08696527210111. – EDN NQPUXR.
9. Массель Л.В. Семантическое моделирование при построении цифровых двойников энергетических объектов и систем / Л.В. Массель, А.Г. Массель // Онтология Проектирования, 2023. – Т. 13. – № 1 (47). – С. 44-54.
10. Массель Л.В. Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения / Л.В. Массель // Онтология проектирования, 2016. – Т. 6. – № 2. – С. 149-161.
11. Массель Л.В. Фрактальный подход к построению информационных технологий // Информационная технология исследований развития энергетики / ред. Криворуцкий Л.Д., Массель Л.В. – Новосибирск: Наука, Изд. фирма РАН, 1995. – С. 40-67.
12. ГОСТ Р ИСО/МЭК 21838-1-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Онтологии высшего уровня (TLO). Часть 1. Требования. – Введ. 2022-04-30. – URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/gost-r_gosudarstvennyj-standart/9/gost_r_iso_mek_21838-1-2021_natsionalnyy_standart_rossiyskoy.html#Par470 (дата обращения: 20.11.2025).

13. Gavrilova T., Laird D. Practical Design of Business Enterprise Ontologies. In: M. Bramer, V. Terziyan (eds.). Industrial Applications of Semantic Web. Boston, MA, Springer US, 2005, pp. 65-81.
14. Массель Л.В. Построение цифровых двойников ветровой и солнечной электростанций на основе онтологического подхода / Л.В. Массель, А.Г. Массель, Н.И. Щукин, и др. // Автоматизация в промышленности, 2022. – № 7. – С. 28-32.
15. ГОСТ Р 57721-2017. Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Эксперимент виртуальный. Общие положения. – Введ. 2017-01-01.
16. Chapman P., Clinton J., Kerber R. et al. CRISP-DM 1.0 – Step-by-step data mining guide. 2000, 76 p.
17. ArcGIS REST. Available at: <https://services.arcgisonline.com/arcgis/rest/services> (accessed: 06/14/2025).
18. NASA POWER Hourly API. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/api/pages/> (accessed: 06/14/2025).

Массель Людмила Васильевна. Доктор технических наук, профессор, зав. отделом Систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. Scopus AuthorID: 56440157300, AuthorID: 8466, SPIN: 3757-0830, ORCID: 0000-0002-9088-9012, massel@isem.irk.ru. Россия, Иркутск, Лермонтова д.130.

Цыбиков Алексей Ринчинович. Младший научный сотрудник отдела Систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН. AuthorID: 1148961, SPIN: 3424-3032, ORCID: 0000-0002-0434-8480, tsibikow@mail.ru. Россия, Иркутск, Лермонтова д.130.

Щукин Никита Игоревич. Младший научный сотрудник отдела Трубопроводных систем энергетики, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН. AuthorID: 112253, SPIN: 6038-0410, ORCID: 0000-0001-8331-335X, niksha14@mail.ru. Россия, Иркутск, Лермонтова д.130.

УДК 004.8:620.9

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.003

Methods for building Smart Digital Twins of renewable energy

Liudmila V. Massel, Aleksey R. Tsybikov, Nikita I. Shchukin

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Russia, Irkutsk, tsibikow@mail.ru

Abstract. In the context of the global transition to a low-carbon economy, the design of renewable energy facilities such as solar and wind power plants require consideration of numerous hard-to-predict factors: variability of natural resources, terrain topography, environmental constraints, and economic parameters. Digital twins (DTs) represent a powerful tool for addressing these challenges by providing a virtual representation of a physical asset throughout its entire lifecycle. This article examines proposed methods for constructing Smart Digital Twins, (SDTs) for use in renewable energy facility design. The foundation of the proposed approach is a modified digital twin model based on ontological models. These models formalize key concepts, entities, their attributes within the renewable energy domain, as well as the semantic relationships among them. The ontology provides a unified glossary and data structure, which is critical for integrating heterogeneous information sources and ensuring mutual understanding among system components and specialists. The next step involves transforming this ontology into a smart digital twin model by incorporating intelligent components such as knowledge bases, a virtual environment, artificial intelligence models, schemas, and diagrams. To describe the relationships between models and components, a fractal stratified model is proposed. This model formalizes the knowledge structure and interconnections among ontological, informational, and mathematical models. The article details an adapted ontological engineering methodology tailored for digital twin design tasks, along with a method for constructing a virtual environment that enables debugging of both digital twins and smart digital twins in conditions of intermittent or entirely absent connectivity to the physical asset. To emulate external parameters such as weather conditions, a modified process based on CRISP-DM (Cross-Industry Standard Process for Data Mining) is proposed, facilitating the integration of machine learning models. The practical relevance of the approach is demonstrated through the development of a visualization component for identifying optimal power plant locations and supporting their design. This tool leverages an interactive 3D model of the Earth, satellite data, and meteorological APIs. The implemented solution confirms the feasibility of applying smart digital twins to renewable energy facility design.

Keywords: digital twin, smart digital twin, renewable energy, fractal-stratified model, ontology, machine learning, visualization

Acknowledgements: The research was carried out under State Assignment Project FNEU-2026-0007 of the Fundamental Research Program of Russian Federation, registration number AAAA-A26-121012090007-7.

References

1. Grieves M.W. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. LLC, 2014, 7 p.

2. El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies. IEEE MultiMedia, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 87–92, DOI: 10.1109/MMUL.2018.023121167.
3. Prokhorov A., Lysachev A. Tsifrovoy dvoynik. Analiz, trendy, mirovoy opyt [Digital Twin. Analysis, Trends, World Experience]. Ed. by A.I. Borovkov. Moscow, AlliancePrint Publ., 2020, 401 p.
4. GOST R 57700.37-2021. Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions. Introduced 2022-01-01. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200180928> (accessed: 11.20.2025).
5. Nepsha F.S., Andrievsky A.A., Krasilnikov M.I. Ontologiya kak osnova dlya sozdaniya tsifrovyykh dvoynikov ob"yektov upravleniya intellektual'noy raspredelennoy energetiki [Ontology as a basis for creating digital twins of intelligent distributed energy control objects]. Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Automation in Industry], 2021, no. 1, pp. 27-33, DOI: 10.25728/avtprom.2021.01.04, EDN: ALJNLE.
6. Andryushkevich S.K., Kovalev S.P., Nefedov E.I. Razrabotka tsifrovogo dvoynika energeticheskoy sistemy na osnove ontologicheskoy modeli [Development of a digital twin of an energy system based on an ontological model]. Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Automation in Industry], 2020, no. 1, pp. 51-56, DOI: 10.25728/avtprom.2020.01.10, EDN: OHGEHW.
7. Kovalev S.P. Proyektirovaniye informatsionnogo obespecheniya tsifrovyykh dvoynikov energeticheskikh sistem [Designing information support for digital twins of energy systems]. Sistemy i sredstva informatiki [Systems and Means of Informatics], 2020, vol. 30, no. 1, pp. 66-81, DOI: 10.14357/08696527200106, EDN: UNOOKU.
8. Kovalev S.P. Primeneniye neyronnykh setey glubokogo obucheniya v matematicheskom obespechenii tsifrovyykh dvoynikov elektroenergeticheskikh sistem [Application of deep learning neural networks in mathematical support of digital twins of electric power systems]. Sistemy i sredstva informatiki [Systems and Means of Informatics], 2021, vol. 31, no. 1, pp. 133-144, DOI: 10.14357/08696527210111, EDN: NQPUXR.
9. Massel L.V., Massel A.G. Semanticheskoye modelirovaniye pri postroyenii tsifrovyykh dvoynikov energeticheskikh ob"yektov i sistem [Semantic modeling in the construction of digital twins of energy objects and systems]. Ontologiya proyektirovaniya [Ontology of Designing], 2023, vol. 13, no. 1 (47), pp. 44-54.
10. Massel L.V. Fraktal'nyy podkhod k strukturirovaniyu znaniy i primery yego primeneniya [Fractal approach to knowledge structuring and examples of its application]. Ontologiya proyektirovaniya [Ontology of Designing], 2016, vol. 6, no. 2, pp. 149-161.
11. Massel L.V. Fraktal'nyy podkhod k postroyeniyu informatsionnykh tekhnologiy [Fractal approach to building information technologies]. In: L.D. Krivorutsky, L.V. Massel (eds.). Informatsionnaya tekhnologiya issledovaniy razvitiya energetiki [Information Technology for Energy Development Research]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995, pp. 40-67.
12. GOST R ISO/IEC 21838-1-2021. National Standard of the Russian Federation. Information technology. Top-level ontologies (TLO). Part 1. Requirements. Introduced 2022-04-30. Available at: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/gost-r_gosudarstvennyj-standart/9/gost_r_iso_mek_21838-1-2021_natsionalnyy_standart_rossiyskoy.html#Par470 (accessed: 11.20.2025).
13. Gavrilova T., Laird D. Practical Design of Business Enterprise Ontologies. In: M. Bramer, V. Terziyan (eds.). Industrial Applications of Semantic Web. Boston, MA, Springer US, 2005, pp. 65-81, DOI: 10.1007/0-387-28597-4_5.
14. Massel L.V., Massel A.G., Shchukin N.I., Tsybikov A.R., Losev A.S. Postroyeniye tsifrovyykh dvoynikov vetrovoy i solnechnoy elektrostantsiy na osnove ontologicheskogo podkhoda [Construction of digital twins of wind and solar power plants based on an ontological approach]. Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Automation in Industry], 2022, no. 7, pp. 28-32.
15. GOST R 57721-2017. Information and communication technologies in education. Virtual experiment. General provisions. Introduced 2017-01-01.
16. Chapman P., Clinton J., Kerber R. et al. CRISP-DM 1.0 – Step-by-step data mining guide. 2000, 76 p.
17. ArcGIS REST. Available at: <https://services.arcgisonline.com/arcgis/rest/services> (accessed: 06/14/2025).
18. NASA POWER Hourly API. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/api/pages/> (accessed: 06/14/2025).

Massel Liudmila Vasilyevna. D.Sc. (Tech.), professor, Head of the Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Sector, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. Scopus AuthorID: 56440157300, AuthorID: 8466, SPIN: 3757-0830, ORCID: 0000-0002-9088-9012, massel@isem.irk.ru. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.

Tsybikov Aleksey Rinchinovich. Research Fellow of the Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Sector, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS AuthorID: 1148961, SPIN: 3424-3032, ORCID: 0000-0002-0434-8480, tsibikow@mail.ru. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.

Shchukin Nikita Igorevich. Research Fellow of Pipeline Energy Systems, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. AuthorID: 1122536, SPIN: 6038-0410, ORCID: 0000-0001-8331-335X, niksha14@mail.ru. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.

Статья поступила в редакцию 16.10.2025; одобрена после рецензирования 12.02.2026; принята к публикации 12.02.2026.

The article was submitted 10/16/2025; approved after reviewing 02/12/2026; accepted for publication 02/12/2026.