На правах рукописи

Цыбиков Алексей Ринчинович

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ)

Специальность 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Иркутск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ **Массель Людмила Васильевна**

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита состоится

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Концепция цифрового двойника (ЦД) является составляющей четвертой промышленной революции, связанной с направлением «Интернет вещей». Эта концепция описывает цифровой двойник как виртуальный прототип физического объекта, предполагающий обмен данными с реальным объектом.

Цифровые двойники позволяют оценивать ситуацию, оказывать помощь при проектировании объекта, прогнозировать его поведение, наблюдать за процессами, связанными с объектом, а также использоваться в системах управления и поддержки принятия решений. На протяжении всего жизненного цикла объекта возможно применять технологию цифрового двойника. Цифровой двойник может изменяться на каждой стадии жизненного цикла объекта, используя различные наполнения, а также функциональные особенности.

Особое значение имеет рассмотрение цифрового двойника как инструмента сопровождения объекта на различных стадиях жизненного цикла – от проектирования до эксплуатации и модернизации. Согласно ГОСТ Р 57700.37–2021, цифровой двойник разрабатывается и применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия, изменяясь на каждой стадии, а его наполнение и функциональность зависят от текущей стадии жизненного цикла. В стандарте также отмечается, что применение цифрового двойника на стадии разработки позволяет обосновывать проектные решения, проводить цифровые испытания, анализировать влияние изменений параметров и определять критические зоны, включая обоснование состава датчиков для последующей эксплуатации.

На этапе проектирования солнечной электростанции цифровой двойник может выполнять функции цифрового прототипа: обеспечивать формирование структуры объекта, выбор состава оборудования, расчёт ожидаемой выработки, анализ влияния климатических факторов и проверку проектных решений в виртуальной среде. Такой подход соответствует современному пониманию цифрового двойника как средства интеграции физических и виртуальных данных, используемых для поддержки проектирования, производства и сервисного сопровождения объекта.

После ввода солнечной электростанции в эксплуатацию функциональность цифрового двойника изменяется: на первый план выходят сбор и обработка телеметрии, формирование цифровой тени, уточнение параметров моделей, прогнозирование выработки, диагностика отклонений и поддержка решений по техническому обслуживанию. В этом случае цифровой двойник становится динамической системой, в которой физический объект и его цифровое представление связаны потоками данных и механизмами обратной связи.

Для фотоэлектрических систем жизненный цикл цифрового двойника особенно важен, поскольку на разных стадиях решаются различные задачи: при проектировании – выбор конфигурации и оценка ожидаемой генерации; при вводе в эксплуатацию – проверка соответствия расчётных и фактических параметров; при

эксплуатации – мониторинг, прогнозирование, выявление аномалий и снижение затрат на обслуживание. В современных обзорах по цифровым двойникам фотоэлектрических установок отмечается, что такие системы применяются для повышения эффективности генерации, прогнозирования энергии и уменьшения затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание, а также для более обоснованного принятия решений на основе данных реального времени.

Концепция цифровых двойников не нова, но лишь в 2016 году появилась на кривой стратегии развития значимых технологий для Интернета вещей института Gartner1, где была обозначена, как технология на стадии запуска. Развитие началось в 2017 году, когда эту технологию американская консалтинговая компания Gartner включила в цикл новых технологий с высоким потенциалом, в 2019 г. она оказалась уже на пике кривой Гартнера.

В 2021 году в рамках Петербургского международного экономического форума был представлен доклад «10 прорывных идей в энергетике на следующие 10 лет» (Global Energy Association, 2021). В это исследование была включена статья директора Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН В.А. Стенникова, посвященная цифровым двойникам. В статье систематизированы их классификационные признаки, проанализированы ключевые преимущества и технологические ограничения при реализации, рассмотрены аспекты информационного обеспечения, методологические подходы к построению, а также практические кейсы внедрения цифровых двойников в различных отраслях промышленности.

В последнее время появился термин «умный цифровой двойник» (Smart Digital Twin), который до сих пор четко не определен, но очевидно, что в его состав должны входить методы искусственного интеллекта. Необходимы разработка методов построения и модели умного цифрового двойника, выбор моделей машинного обучения для использования в ЦД энергетических объектов, в частности, в ЦД солнечной электростанции. Кроме того, недостаточно проработан вопрос использования научного инструментария (результатов исследования систем и объектов энергетики) при построении ЦД. Это обусловливает актуальность предложенной работы, в которой предлагается решение поставленных вопросов.

Степень разработанности проблемы. В настоящее время существует ряд работ, посвящённых изучению данной проблемы.

В ИСЭМ СО РАН исследования энергетических систем рассматривались в работах Воропая Н.И., Криворуцкого Л.Д., Кононова Ю.Д., Мелентьева Л.Н., Макарова А.А., Санеева Б.Г. и др. Исследования цифровых двойников представлены в работах М. Гривза (M. Grieves), К. Шваба (K. Schwab), Боровкова А.И., Ковалева С.П., Прохорова А.Н., Бахтадзе Н.Н. и др. Вопросы применения интеллектуальных технологий в исследованиях энергетики и построении цифровых двойников

[1] Gartner – исследовательская и консалтинговая компания, публикующая аналитические материалы и прогнозы в области информационных технологий и цифровой трансформации

рассматривались в работах: Массель Л.В., Масселя А.Г., Новицкого Н.Н., Ковалева С.П., Ворожцовой Т.Н., Макагоновой Н.Н., Томина Н.В., Гальперова В.И., Барахтенко Е.А., Соколова Д.В., Домышева А.В., Сидорова Д.Н., Волошина А.А. и др.

В то же время в этих работах не рассматривалась задача разработки интегрированного методического подхода к построению цифровых двойников, объединяющего проектирование компьютерных моделей, цифровой тени, основанной на моделировании данных, и методов искусственного интеллекта (онтологического моделирования и методов машинного обучения) в рамках умного цифрового двойника. В диссертационной работе ставится и решается эта задача.

Цель работы: Разработка методического подхода к построению умных цифровых двойников с использованием интеллектуальных технологий, в частности, моделей машинного обучения.

Поставлены и решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ существующих математических моделей и методов машинного обучения и возможностей их применения при разработке умных цифровых двойников.
2. Построена модель ЦД солнечной электростанции и предложена формализованная модель умного цифрового двойника на основе модификации базовой модели ЦД.
3. Выполнена адаптация численного метода ансамблирования моделей с динамическим выбором на основе состояния внешней среды для повышения точности прогнозирования временных рядов в составе виртуальной среды цифрового двойника солнечной электростанции.
4. Разработаны методики построения умного цифрового двойника с применением онтологического и математического моделирования и моделей машинного обучения, и виртуальной среды для эмулирования данных цифрового двойника солнечной электростанции на этапе научного прототипирования.
5. Разработана агентно-сервисная архитектура цифрового двойника солнечной электростанции и реализован программный комплекс (научный прототип умного цифрового двойника солнечной электростанции), интегрирующий основные базовые компоненты ЦД.

Объектом исследования являются энергетические объекты - солнечные электростанции.

Предметом исследования являются построение умных цифровых двойников для проектирования солнечных электростанций.

Методология и методы исследования: для решения поставленных задач использовались: методы математического моделирования, методические основы построения интеллектуальных информационных систем в исследованиях энергетики; методы инженерии знаний; методы анализа данных, методы машинного обучения; методы агентно – ориентированного проектирования, программирования

и разработки многоагентных систем; методы проектирования и программирования web – приложений с использованием средств языка Python.

Достоверность научных результатов исследования обеспечивается разработанными и корректными математическими моделями солнечных электростанций и методами машинного обучения, применением реальных и эмулированных данных при исследовании виртуальной среды цифрового двойника солнечной электростанции, сравнительным анализом результатов работы моделей машинного обучения по стандартным метрикам качества.

Положения, составляющие предмет научной новизны:

1. Впервые предложен методический подход к построению ЦД СЭС, отличающийся интеграцией математических и семантических моделей с интеллектуальными компонентами машинного обучения и включающий методику построения умного цифрового двойника и численный метод ансамблирования моделей с динамическим выбором на основе состояния внешней среды.
2. Построены математическая модель ЦД СЭС и формализованная модель умного цифрового двойника на основе модификации базовой модели цифрового двойника, отличающаяся добавлением описаний моделей искусственного интеллекта, базы знаний и виртуальной среды.
3. Выполнена адаптация численного метода ансамблирования моделей машинного обучения с динамическим выбором, отличающаяся использованием онтологий и учетом состояния внешней среды.
4. Предложена методика построения виртуальной среды, отличающаяся возможностью эмуляции данных для отладки цифрового двойника (научного прототипирования).
5. Разработана агентно – сервисная архитектура умного цифрового двойника и выполнена реализация программного комплекса, интегрирующего вычислительное ядро, цифровую тень и виртуальную среду, и являющегося научным прототипом цифрового двойника солнечной электростанции.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методический подход к построению ЦД СЭС, включающий методику построения умного цифрового двойника, основанную на интеграции математических и семантических моделей с интеллектуальными компонентами машинного обучения, и применение численного метода ансамблирования моделей с динамическим выбором на основе состояния внешней среды.
2. Математическая модель ЦД СЭС и формализованная модель умного цифрового двойника на основе модификации базовой модели цифрового двойника
3. Численный метод ансамблирования моделей машинного обучения с динамическим выбором на основе состояния внешней среды.
4. Методика построения виртуальной среды, обеспечивающей эмуляцию данных для отладки цифрового двойника (научного прототипирования).
5. Агентно – сервисная архитектура умного цифрового двойника, предусматривающая интеграцию вычислительного ядра, цифровой тени и

виртуальной среды для решения задач проектирования и прогнозирования работы солнечной электростанции.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки) по следующим пунктам:

- П.2. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий. (положения 1, 2, 3 новизны)
- П.3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента. (положение 5 новизны)
- П.9. Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий (технические науки). (положения 3, 4, 5 новизны)

Теоретическая значимость работы заключается в разработке методического подхода к построению умных цифровых двойников энергетических объектов, основанного на интеграции математических моделей, методов машинного обучения и численного метода ансамблирования моделей с динамическим выбором состояния внешней среды в виртуальной среде, и возможностью его тиражирования.

Практическая значимость работы: определяется возможностью применения предложенных методов и алгоритмов для разработки ЦД солнечных электростанций (СЭС), а также программной реализацией научного прототипа умного цифрового двойника СЭС для проектирования ЦД, прогнозирования и расчета выходных значений СЭС.

Результаты диссертационной работы переданы в Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси. Кроме того, результаты диссертационной работы применяются в ИРНИТУ и ИГУ при чтении курсов лекций «Интеллектуальные системы и технологии». Получены шесть свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных.

Результаты диссертационной работы отмечены именной стипендией Губернатора Иркутской области (2023 г.). В 2024 г. автор в составе молодежного коллектива стал лауреатом Иркутского областного конкурса в сфере науки и техники, в номинации «За лучшие научные, научно – технические и инновационные разработки молодых ученых».

Апробация работы: Результаты работы, а также результаты отдельных исследований и разработок автора докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях: VIII Международной конференции «ЗНАНИЯ – ОНТОЛОГИИ – ТЕОРИИ» (2021 г., Новосибирск, Россия); International Conference “Intelligent Systems” (INTELS) (2022 г., Москва, Россия); VIII Международной конференции «Физико – техническая информатика» (2022 – 2024 гг., Нижний Новгород, Россия); Международной конференции "Интеллектуальная индустрия"

(SmartIndustryCon) (2024, 2026); Байкальской Всероссийской конференции с международным участием «Информационные и математические технологии в науке и управлении» (2021 – 2025 гг., Иркутск, Байкал, Россия); Международном семинаре «Критические инфраструктуры в цифровом мире» (IWCI), (2021 – 2026 гг., Иркутск, Байкал, Россия); Конференции молодых ученых ИСЭМ СО РАН «Системные исследования в энергетике» (2021 – 2025 гг., Иркутск, Россия); заседаниях секций Ученого совета ИСЭМ СО РАН и семинарах отдела Систем искусственного интеллекта в энергетике ИСЭМ СО РАН.

Исследования выполнялись в рамках проектов:

1. Грант РФФИ № 20-07-00994 «Методы и модели поддержки коллективных экспертных решений по стратегическому инновационному развитию энергетической инфраструктуры РФ с применением технологии Big Data», 2020-2022 гг,
2. Грант РНФ № 23-21-00382, «Разработка и интеграция методов и технологий построения цифровых двойников энергетических объектов (на примере возобновляемых источников энергии)» 2023-2024 гг.
3. Государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FWEU-2021-0007 Методология построения ИТ-инфраструктуры для разработки интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики»).

Публикации. По теме исследований опубликованы 17 работ, в том числе 4 – в журналах из перечня ВАК по специальности, 4 статьи проиндексированы в Scopus и WOS, 3 – в других изданиях, получены 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения списка сокращений и условных обозначений, приложений, изложенных на 147 страницах, которые включают список литературы из 103 наименований.

Личный вклад. Постановка задачи выполнена совместно с руководителем. Типовая методика построения ЦД ВИЭ и типовая архитектура ЦД ВИЭ разработаны с участием автора в неделимом соавторстве. Личный вклад автора состоит в разработке методического подхода, включающего методику построения умного цифрового двойника солнечной электростанции и виртуальной среды. Результаты, составляющие новизну и выносимые на защиту, получены лично автором, в частности, предложены модель умного цифрового двойника, модель солнечной электростанции для интеграции в цифровой двойник, метод ансамблирования моделей машинного обучения. Автором разработаны архитектура и программные компоненты умного цифрового двойника, а также проведен вычислительный эксперимент для определения погодных характеристик для ЦД.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулирована цель работы и определены задачи, необходимые для её достижения. Сформулированы основные положения, составляющие научную новизну и выносимые на защиту. Приводится общая характеристика работы.

В первой главе выполнен анализ предметной области, рассмотрены преимущества возобновляемых источников энергии, таких, как солнечная энергетика, и их роль в энергоснабжении труднодоступных регионов. Анализируется состояние области исследований: разработка цифровых двойников и их применение в солнечной энергетике. Рассмотрены методы машинного обучения, включая рекуррентные нейронные сети, бустинг и ансамблевые методы, и их использование для прогнозирования и анализа данных. Уделено внимание агентному и сервисному подходам к построению информационных и программных систем. Проводится постановка задачи.

Автором сформулировано определение **умного цифрового двойника –** это автономная цифровая копия объектов или систем, которая способна воспроизводить поведение, анализировать и предсказывать работу, используя методы искусственного интеллекта, реальные или эмулированные данные из виртуальной среды. Обоснован переход к нему от цифрового двойника на основе модификации формализованной модели ЦД.

Формализованная модель цифрового двойника (Digital Twin) имеет следующий вид:

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

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.

Автором предложена модификация этой модели, описывающая умный ЦД (Smart Digital Twin) и имеющая вид:

$$SDT = (IM, MM, DB, VT, SE, RC, KB, VS, AIM), \quad (2)$$

где *AIM* – модели искусственного интеллекта, *KB* – базы знаний, *VS* – виртуальн*ая* среда (остальные обозначения имеют тот же смысл, что в (1).

Для описания интеграции интеллектуальных технологий в умном цифровом двойнике предлагается использовать фрактальный подход к структурированию знаний[2].

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

[2] Массель, Л. В. Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения / Л. В. Массель // Онтология проектирования. – 2016. – Т. 6, № 2(20). – С. 149-161. – DOI 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161. – EDN WKEAVR.

область – один из фрагментов информационного пространства, его можно представить в виде вырезки (например, конуса), в котором выделены рассматриваемые слои. Умный ЦД может быть представлен слоями конуса, где выделяются: слой онтологических моделей, слой математических моделей, слой информационных моделей и слой интеллектуальных технологий *AIM.* Последний, в свою очередь может быть расслоен, как:

$$AIM = (SM, ES, ML), \quad (3)$$

где SM – семантические модели, *ES* – экспертные системы, ML – модели машинного обучения.

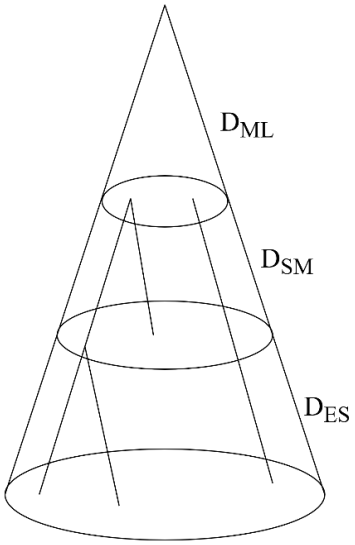

Рисунок 1– ФС-модель интеллектуальных технологий, интегрируемых в умный цифровой двойник.

Комментарий к рисунку 1: согласно фрактальному подходу, можно ввести отображения слоев:

- $F_{SM}^{ML}: D_{ML} \to D_{SM}$ – отображение из слоя моделей машинного обучения *SDT* в слой семантических моделей *SDT*;
- $F_{ES}^{ML}: D_{ML} \to D_{ES}$ – отображение из слоя моделей машинного обучения *SDT* в слой экспертных систем *SDT*;
- $F_{ES}^{SM}: D_{SM} \to D_{ES}$ – отображение из слоя семантических моделей SDT в слой экспертных систем *SDT.*

Для интеграции интеллектуальных технологий в умном ЦД выделены три слоя, соответствующие (3). Выделены слои: D_{ML} – слой моделей машинного обучения умного ЦД (*SDT*)); D_{SM} – слой семантических моделей *SDT;* D_{ES} – слой экспертных систем *SDT* (рис. 1).

Слои представляют собой модели представления знаний (базы знаний) конкретных интеллектуальных технологий, а отображения поддерживаются инструментальными средствами, обеспечивающими переход от одной модели представления знаний к другой.

Выполнено моделирование солнечной электростанции в составе умного цифрового двойника. В рамках настоящего исследования рассматривается ее частный случай, связанный с прогнозированием выходных характеристик на основе данных виртуальной среды. Решение этой задачи осуществляется с использованием методов машинного обучения, рассматриваемых далее.

Построена математическая модель солнечной электростанции, в которой функционирование СЭС может быть представлено в виде соотношения:

$$Y(t) = F(X(t), \Theta), \quad (4)$$

где X(t) – вектор входных параметров среды, Y(t) – вектор выходных характеристик системы, Θ – параметры модели СЭС: площадь панели, коэффициенты потерь, температурные коэффициенты, параметры фотоэлектрического преобразователя и др.

Вектор входных параметров среды задается в виде

$$X(t) = \{G(t), T(t), V(t), p(t)\}, \quad (5)$$

где G(t) – солнечная радиация, T(t) – температура воздуха, V(t) – скорость ветра, p(t) – атмосферное давление.

Функция $F(X(t), \Theta)$, определяющая связь между входными и выходными параметрами, может быть конкретизирована математическими моделями функционирования солнечной электростанции. В качестве такого описания могут использоваться формулы 6 – 14, отражающие основные зависимости, характеризующие процесс преобразования солнечной энергии в электрическую энергию.

Для расчета мощности, вырабатываемой солнечной панелью, используется формула:

$$P_{pv}(t) = G_h(t) \cdot \eta \cdot A, \quad (6)$$

где $P_{pv}(t)$ – выходная мощность, Вт; η – КПД панели в стандартных условиях, отн.ед; A – площадь панели, м²; $G_h(t)$ – солнечная радиация, поступающая на поверхность, Вт/м².

В книге Solar Engineering of Thermal Processes описан расчет полной радиации ($G_T(t)$) на солнечную панель.

$$G_T(t) = G_b(t) \cdot R_b(t) + G_d(t) \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + G(t) \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right), \quad (7)$$

где $G_b(t)$ – прямая радиация, Вт/м²; $G_d(t)$ – диффузная радиация, Вт/м²; $G(t) = G_b(t) + G_d(t)$ – полная радиация на горизонтальную поверхность, Вт/м²; $R_b(t) = \frac{\cos\,\theta(t)}{\cos\,\theta_z(t)}$ – геометрический фактор; $\theta(t)$ – угол падения солнечных лучей на наклонную поверхность; $\theta_z(t)$ – зенитный угол Солнца; β – угол наклона панели; ρ – альбедо (коэффициент отражения поверхности).

Угол падения $\theta(t)$ определяется из соотношения:

$$\begin{aligned}\theta = arccos(&\sin\delta \cdot \sin\phi \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \\ &+ \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega \\ &+ \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega),\end{aligned} \quad (8)$$

где θ – угол падения солнечных лучей на поверхность; δ – склонение Солнца; ϕ – широта местности; β – угол наклона поверхности; γ – азимутальный угол поверхности (0° – юг, 90° – запад); ω – часовой угол Солнца.

В работе проводится аналитический обзор скорости деградации солнечных панелей. Этот обзор приводит факторы, влияющие на деградацию солнечных панелей: температура, ультрафиолетовое – излучение и потенциально –

индуцированная деградация. В нем выводятся средние показатели по годовой скорости деградации (r):

Кремниевые модули: 0.5 – 0.8% в год.

Тонкоплёночные: 0.7 – 1.2% в год.

Показатели деградации влияют на мощность работы солнечных панелей; это отображается в формуле:

$$P(\tau) = P_0(1 - r \cdot \tau), \tau \in [0, \tau_{max}], \tau_{max} < \frac{1}{r} \quad (9)$$

где $P(\tau)$ – мощность через τ лет, Вт; P_0 – начальная мощность, Вт; r – годовая скорость деградации ед. в год.

моделирование солнечной электростанции с учетом изменения параметров окружающей среды, где рассматриваются внешние факторы, влияющие на выработку электроэнергии. Эти факторы отображены в формулах:

$$P_{pv}(t) = G_T(t) \cdot \eta(t) \cdot A \cdot k_L, \quad (10)$$

где k_L – коэффициент, учитывающий потери в диодах и из–за загрязнения, принимаемых равным 0,85 – 0,95 отн. ед;

Эффективность пересчитывается в зависимости от уровня солнечной радиации, температуры наружного воздуха и скорости ветра:

$$\eta(t) = \bar{\eta} \cdot [1 - \beta(T_{pv}(t) - 25)], \quad (11)$$

где $\bar{\eta}$ – паспортные значения КПД фотоэлектрического преобразователя, отн. ед; β – температурный коэффициент для кремниевых фотоэлектрических преобразователей (принимается 0,004 – 0,006), отн. ед./°С; T_{pv} – рабочая температура фотоэлектрического преобразователя, °С.

Рабочая температура фотоэлектрического преобразователя определяется по следующей формуле:

$$T_{pv}(t) = T_a(t) + \frac{G_T(t)}{k_0 + k_1 * V_w(t)}, \quad (12)$$

где $k_0, k_1 -$ корреляционные коэффициенты Koehl, равные 30,02 и 6,28; $V_w(t)$ – скорость ветра на поверхности земли, м/с; T_a – температура воздуха, °С.

Далее рассчитывается фототок:

$$I_{PH}(t) = \frac{G_T(t)}{1000}[I_{SC} + k_I(T_{pv}(t) - 25)], \quad (13)$$

где I_{SC} – ток короткого замыкания, А; k_I– температурный коэффициент 0,0038 отн.ед./°С.

Далее рассчитывается напряжение:

$$U_{pv}(t) = P_{pv}(t) / I_{PH}(t) \quad (14)$$

Таким образом, математические формулы 6 – 14 позволяют конкретизировать общую зависимость между внешними параметрами среды и выходными характеристиками солнечной электростанции. Они задают основу для последующего построения цифровой модели и использования ее в составе умного цифрового двойника. При этом в рамках настоящего исследования основное

внимание уделяется не только прямому расчету характеристик по физическим зависимостям, но и задаче прогнозирования выходных величин на основе данных.

В общем случае в качестве целевой выходной переменной может рассматриваться одна из характеристик функционирования солнечной электростанции. Для задач оценки режима генерации такой переменной является мощность генерации СЭС.

$$y^*(t) = P(t), \tag{15}$$

Для задач прогнозирования в составе виртуальной среды в качестве целевой переменной может также рассматриваться солнечная радиация как один из определяющих факторов генерации.

Тогда задача моделирования состоит в построении модели

$$\hat{y}(t) = f(X(t), \Theta), \tag{16}$$

обеспечивающей минимизацию функционала ошибки на заданном множестве наблюдений

$$f * \epsilon \, arg \min_{f \, \epsilon \, \mathcal{F}} \mathcal{L}(\mathcal{D}, f), \tag{17}$$

где $\mathcal{F}$– множество допустимых моделей; $\mathcal{D}$– множество наблюдений; $\mathcal{L}$– функционал ошибки.

В качестве функционала ошибки могут использоваться среднеквадратичная ошибка, средняя абсолютная ошибка и другие метрики, определяемые постановкой вычислительного эксперимента.

Такая постановка задачи служит основой для интеграции математических моделей, средств виртуальной среды и методов машинного обучения в составе умного цифрового двойника. Она позволяет перейти от общей модели цифрового двойника к построению вычислительных и интеллектуальных компонентов, обеспечивающих анализ, прогнозирование и эмуляцию данных.

Автором конкретизировано определение виртуальной среды из ГОСТ 57721-2017 “Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Эксперимент виртуальный. Общие положения” для построения цифровых двойников на этапе прототипирования. Предлагается при построении ЦД понимать под виртуальной средой искусственную среду, созданную с использованием эмуляции и виртуализации, предназначенную 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 нее. Симуляция поведения позволяет проводить сценарное моделирование и анализ данных. Для формирования виртуальной среды требуется определение внешних параметров пространства, в котором функционирует объект. Предлагаемая автором методика построения виртуальной среды для умного цифрового двойника включает этапы:

1. Построение онтологии для определения характеристик объекта.
2. Определение внешних характеристик объекта с помощью онтологий.

3. Выбор моделей машинного обучения с использованием предложенного алгоритма.

4. Интеграция моделей машинного обучения в виртуальную среду.

5. Использование виртуальной среды для эмуляции данных при отладке цифрового двойника.

В результате применения методики была построена система онтологий солнечной электростанции, представленная на рисунке 2. Внешними характеристиками в этом случае являются: потребление электроэнергии, освещенность, давление, температура и т.д.

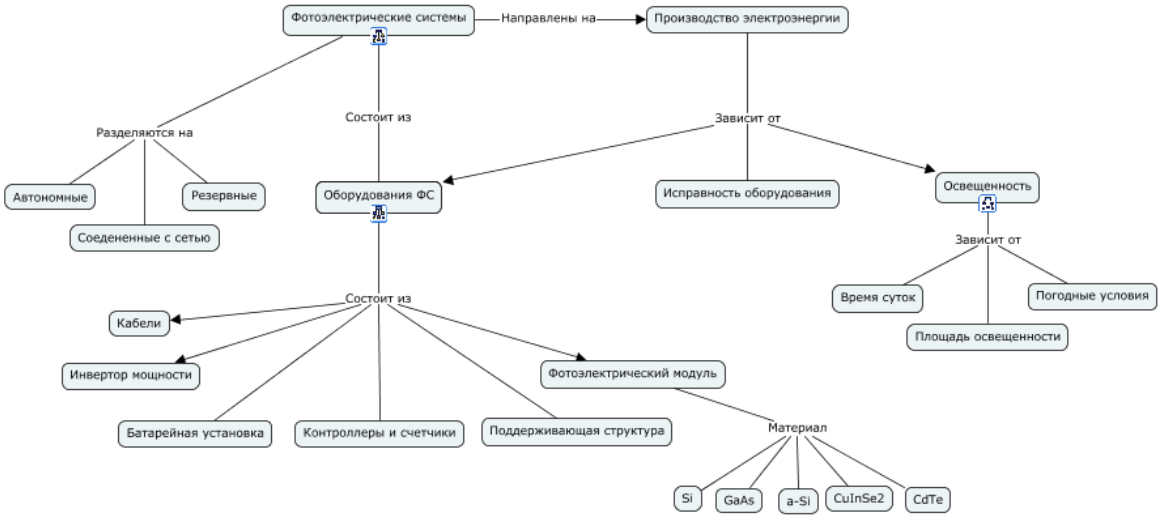

Рисунок 2 – Онтология солнечной электростанции

Для эмуляции данных виртуальной средой автором предложено использовать методы машинного обучения (МО). Для обоснования выбора метода МО автором предлагается использовать модифицированный алгоритм на основе методологии CRISP – DM, включающим этапы:

1. Определение задач и требований к данным – определение задач, которые решаются методом машинного обучения в виртуальной среде; формулирование требований к оценкам качества моделей МО, а также их приоритет; на задачи и требования могут влиять наличие данных для этого объекта, а также их количество. Основные метрики представлены в таблице 1.

2. Анализ данных – анализ источников данных (например, данные датчиков, исторические записи, внешние базы данных), оценка качества данных (например, наличие пропусков, аномалий, шума); исследование временных зависимостей и сезонности в данных. Для выполнения оценки данных предлагается использовать разведочный анализ данных (Exploratory data analysis, EDA).

3. Подготовка данных – очистка, преобразование, агрегирование, формирование признаков, нормализация данных и т.д. На основе выполнения анализа данных выполняются эти шаги, при необходимости.

4. Оптимизация гиперпараметров – для обучения сети ставятся задачи оптимизации гиперпараметров и регуляризации.

Таблица 1 – Сравнение метрик оценки моделей

Метрика	Преимущества	Недостатки
RMSE	Чувствительна к большим ошибкам, интерпретируема в единицах целевой переменной.	Сильно штрафует выбросы.
MAE	Устойчива к выбросам, проста для интерпретации.	Не учитывает квадратичные ошибки, менее чувствительна к резким отклонениям.
MAPE	Выражается в процентах, удобна для сравнения моделей.	Не работает при нулевых значениях y_i, искажает ошибки для малых величин.
R^2	Показывает долю объяснённой дисперсии, нормирована на [-1, 1].	Может быть завышен при переобучении, не чувствительна к смещениям.

Постановка задачи оптимизации для рекуррентных нейронных сетей:

Минимизация целевой функции $f(\lambda)$ на пространстве гиперпараметров Λ:

$$\lambda^* = arg\min_{\lambda \epsilon \Lambda} f(\lambda), \quad (18)$$

где λ – вектор гиперпараметров; Λ – пространство гиперпараметров; $f(\lambda)$ – целевая функция.

Предлагаемые методы решения:

- Поиск по сетке (Grid Search):

$$\lambda^* = arg\min_{\lambda \epsilon \mathcal{G}} f(\lambda), \quad (19)$$

где $\mathcal{G} \subset \Lambda$ – дискретная сетка значений.

- Случайный поиск (Random Search):

$$\lambda = arg\min_{\lambda \sim p(\lambda)} f(\lambda), \quad (20)$$

где $p(\lambda)$ – распределение на Λ.

- Байесовская оптимизация

Функция приобретения для следующего λ:

$$\lambda_{t+1} = arg\max_{\lambda \epsilon \Lambda} EI(\lambda), \quad (21)$$

где, EI(λ) – функция ожидаемого улучшения.

Целевая функция для нахождения гиперпараметров LSTM, при использовании метрики RMSE:

$$f(\lambda) = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \hat{y}_i(\lambda)\right)^2}, \quad (22)$$

где λ – (λ_1, λ_2, λ_3 λ_4), λ_1 – число слоев, λ_2 – число нейронов в слое, λ_3 – слои dropout, λ_4 – размер batch size; $\hat{y}_i(\lambda)$ – предсказание с гиперпараметрами λ.

5. Обучение модели – выполняется обучение выбранных моделей, которое включает регуляризацию.

6. Оценка решения: происходит оценка итоговых моделей на основе метрик RMSE, MAE и R^2.

7. Интеграция – интеграция выбранной модели МО в виртуальную среду для использования в реальных условиях.

Автором разработан численный метод ансамблирования моделей с выбором на основе состояния внешней среды EnvSwitch (Environment – based Switching). Метод реализует принцип адаптивного прогнозирования за счёт комбинирования разнородных моделей машинного обучения в зависимости от текущего режима функционирования внешней среды.

Формальная постановка задачи заключается в следующем. Пусть на входе имеется вектор признаков:

$$x_t = (G_t, T_t, v_t, \dots)^T \in \mathbb{R}^d \quad (23)$$

где G_t– инсоляция (Вт/м²), T_t– температура воздуха (°C), v_t– скорость ветра (м/с) и другие внешние характеристики в момент времени t.

Требуется предсказать целевую переменную – выработку электроэнергии СЭС:

$$y_t = P_{\text{выр}}(t) \quad (24)$$

Метод EnvSwitch предполагает использование **ансамбля** $\mathcal{M} = \{M_1, M_2, \dots, M_K\}$ разнородных моделей машинного обучения:

- рекуррентные нейронные сети (LSTM, GRU) – для захвата долгосрочных временных зависимостей;
- градиентный бустинг (XGBoost) – для высокой точности на малых и средних выборках;
- статистическая модель – основанная на формулах с учётом деградации панелей и угла наклона.

Каждая модель, входящая в ансамбль $\mathcal{M} = \{M_1, \dots, M_K\}$, проходит индивидуальную процедуру оптимизации гиперпараметров в рамках этапа подготовки. Для рекуррентных сетей (LSTM, GRU) оптимизируются: количество слоёв, число нейронов, dropout-коэффициенты, размер батча. Для XGBoost – глубина деревьев, скорость обучения, число деревьев и т.д. Оптимизация выполняется отдельно для каждого режима среды $s \in S$или на полном датасете, в зависимости от объёма данных.

Каждая модель M_kспециализируется на определённом **режиме среды** $s \in S$, где S – конечное множество режимов, таких, как: «ясное утро», «резкое затенение», «зимняя ночь», «облачная стабильная погода» и др.

Режимы определяются двумя способами:

1. **Онтологически** – на основе экспертных правил, сформулированных в рамках онтологии СЭС (см. рис. 2). Например: *Если* $G_t < 10$ *Вт/м² и* $T_t < 0°C$, *то* $s =$ «зимняя ночь».

2. **Автоматически** – через кластеризацию (k-means) нормализованных признаков внешней среды.

На этапе подготовки для каждого режима s оценивается качество каждой модели M_k по метрике RMSE на соответствующей подвыборке данных:

$$RMSE_{sk} = \sqrt{\frac{1}{|I_s|}\sum_{i \epsilon I_s}(y_i - M_k(x_i))^2} \quad (25)$$

где I_s– индексы наблюдений, принадлежащих режиму s, $|I_s|$ – их количество.

На их основе строится матрица весов $W = [w_{sk}]$, где вес обратно пропорционален ошибке:

$$w_{sk} = \frac{1}{RMSE_{sk} + \varepsilon} \quad (26)$$

ε – малая константа (например, 10^{-6}) для избежания деления на ноль.

Такой подход обеспечивает плавный переход между моделями, повышает общую устойчивость прогноза и позволяет эффективно работать как в стационарных, так и в резко меняющихся погодных условиях.

Приведена типовая методика построения ЦД, в разработке которой принимал участие автор, и выполнена предлагаемая автором **ее конкретизация для разработки ЦД СЭС**, при этом внимание акцентируется на следующих этапах:

1. Онтологический инжиниринг предметной области (соответствующей энергосистемы) и построение онтологической модели.
2. Разработка цифровой модели физического (энергетического) объекта или системы.
3. Реализация цифровой тени физического объекта.
4. Разработка цифровых двойников энергетических объектов.
5. Отладка цифрового двойника с использованием виртуальной среды.
6. Разработка умных цифровых двойников энергетических объектов.

В третьей главе рассмотрена разработка цифрового двойника солнечной электростанции с использованием предложенной методики.

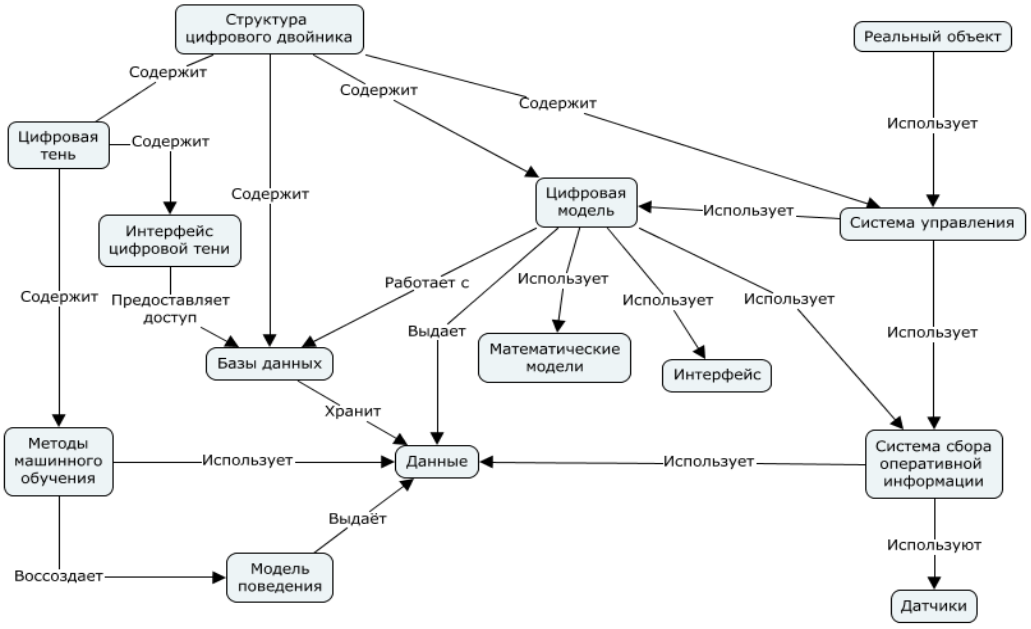

Рис. 4 – Структура цифрового двойника

Представлена структура цифрового двойника в виде онтологии на рисунке 4. На основе этой онтологии и модели цифрового двойника автором разработана **агентно-сервисная архитектура цифрового двойника.**

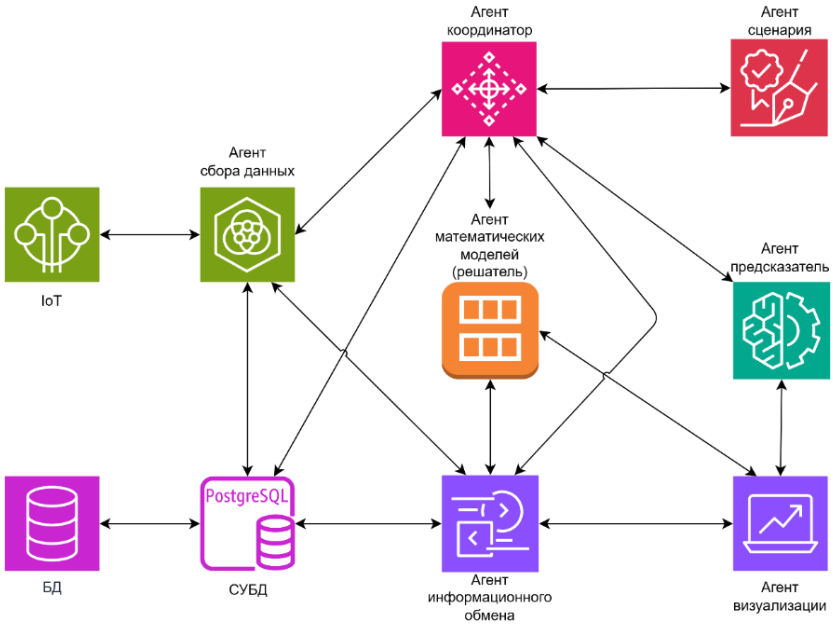

Рис. 5 – Схема взаимодействия агентов-сервисов умного цифрового двойника.

Комментарии к рис. 5: 1) Агент-координатор выполняет управлением системой и исполнение сценариев; 2) Агент сценариев хранит типовые и экстренные сценарии работы системы, а также генерирует пошаговые инструкции для других агентов; 3) Агент математических моделей (решатель) осуществляет функцию расчетов необходимых характеристик при функционировании объектов.; 4) Агент сбора данных обеспечивает получение данных от датчиков и IoT - устройств (Интернета вещей), а также передачу в СУБД; 5) Агент-предсказатель решает задачи прогнозирования различных характеристик при функционировании объектов; 6) Агент визуализации выполняет формирование пользовательских интерфейсов и содержит инструменты для визуальной аналитики; 7) Агент информационного обмена – реализует различные типы эмуляторов Scada–систем для эмуляции данных и организации информационного обмена между объектами реального мира (датчиками) и остальными агентами.

Агентно-сервисная архитектура представляет собой метод проектирования систем, который объединяет принципы агентных технологий и сервис-ориентированной архитектуры (SOA). Интеграция обеспечивается модификацией сервисов путем добавления свойств агентов. Это повышает гибкость, масштабируемость и автономность систем. Агенты - сервисы в этом случае будут выступать, как самостоятельные программы, которые объединяются в программный комплекс. Схема взаимодействия агентов – сервисов представлена на рисунке 5.

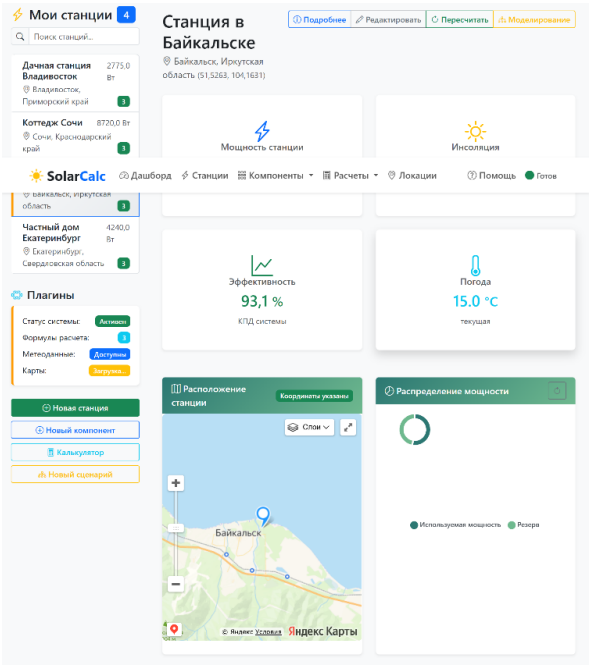

Рис. 6 – Интерфейс окна для задания параметров панелей

На основе онтологии (рис. 2) выделены сущности базы данных, которая является основным компонентом цифровой тени, а также реализована компьютерная модель для цифрового двойника солнечной электростанции.

Пример интерфейса изображен на рисунке 6.

Реализован приведенный во второй главе алгоритм EnvSwitch, реализующий предложенный численный метод выбора метода машинного обучения, используемого в виртуальной среде. Его применение рассматривается на примере задачи прогнозирования инсоляции.

На рисунке 7 показаны результаты работы алгоритма EnvSwitch на полном наборе данных. В отличие от отдельных моделей, в данном случае прогноз формируется за счёт динамического выбора одной из предобученных моделей в зависимости от текущих характеристик временного окна.

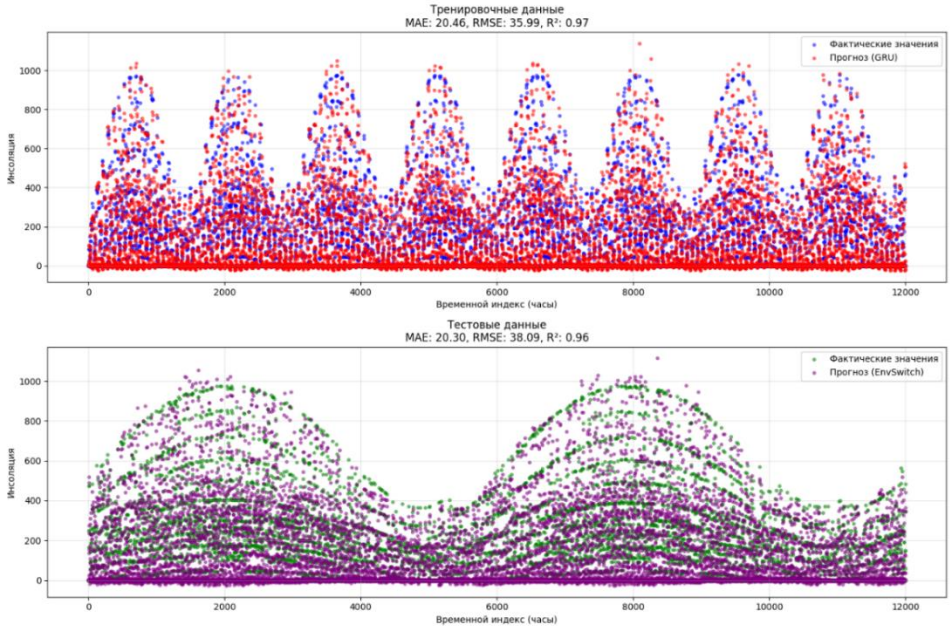

Рис. 7 – Пример работы EnvSwitch

В таблицах 2 и 3 представлены результаты работы моделей; для оценки использованы метрики RMSE, MAE и R^2

Таблица 2. Метрики для оценки моделей датасета с 88889 значений

	LSTM			GRU			XGBoost			EnvSwitch		
	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE	R^2
Train	71,32	39,35	0.88	70,71	38,7	0.88	34,7	16,51	0,97	**35,99**	**20,46**	**0,97**
Test	74,08	41.11	0.87	58,7	37.04	0.91	51,11	24,17	0,94	**38,09**	**20,30**	**0,96**

Таблица 3. Метрики для оценки моделей датасета с 20000 значений

	LSTM			GRU			XGBoost			EnvSwitch		
	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE	R^2
Train	74,1	42,3	0.87	73,58	42,58	0,87	26,23	13,37	0,98	**56,67**	**37,09**	**0,92**
Test	79,12	46,05	0.88	79,8	47,25	0,88	36,16	18,5	0,98	**55,01**	**36,08**	**0,94**

Полученные результаты имеют практическое значение для разработки цифрового двойника солнечной электростанции, поскольку показывают, что выбор модели прогнозирования не может основываться только на её потенциальной точности или объёме доступных обучающих данных. В зависимости от текущего состояния временного ряда и объёма информации, используемой для обучения, эффективность различных моделей существенно различается. В этих условиях целесообразным является применение адаптивного подхода, реализованного в авторском алгоритме EnvSwitch, который обеспечивает динамический выбор модели прогнозирования. Это позволяет использовать алгоритмы на основе деревьев решений в режимах с ограниченной информативностью данных и рекуррентные нейронные сети при работе с полными временными рядами, тем самым повышая устойчивость и точность прогнозирования в составе цифрового двойника.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Достигнута цель диссертационной работы: разработан методический подход к построению цифровых двойников, включающий построение формализованной модели умного цифрового двойника; разработку численного метода ансамблирования моделей машинного обучения с выбором на основе состояния внешней среды; разработку типовой методики построения ЦД и ее конкретизацию для ЦД СЭС; реализацию программного комплекса – научного протототипа ЦД СЭС.

В ходе работы автором получены следующие результаты:

1. Выполнен анализ существующих математических моделей и методов машинного обучения и возможностей их применения при разработке умных цифровых двойников.
2. Построена модель ЦД солнечной электростанции и предложена формализованная модель умного цифрового двойника на основе модификации базовой модели ЦД.
3. Выполнена адаптация численного метода ансамблирования моделей с динамическим выбором на основе состояния внешней среды для повышения

точности прогнозирования временных рядов в составе виртуальной среды цифрового двойника солнечной электростанции.

4. Разработаны методики построения умного цифрового двойника с применением онтологического и математического моделирования и моделей машинного обучения и виртуальной среды для эмулирования данных цифрового двойника солнечной электростанции на этапе научного прототипирования.

5. Разработана агентно – сервисная архитектура цифрового двойника солнечной электростанции и реализован программный комплекс (научный прототип умного цифрового двойника солнечной электростанции), интегрирующий основные базовые компоненты ЦД.

Результаты диссертационной работы применены при выполнении базового проекта по госзаказу ИСЭМ СО РАН (АААА-А21-121012090007-7) “Методология построения ИТ – инфраструктуры для разработки интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики” и проекта по гранту РНФ (№ 23-21-00382) “Разработка и интеграция методов и технологий построения цифровых двойников энергетических объектов (на примере возобновляемых источников энергии)”

Результаты диссертационной работы отмечены именной стипендией Губернатора Иркутской области (2023 г.). В 2024 г. автор в составе молодежного коллектива стал лауреатом Иркутского областного конкурса в сфере науки и техники, в номинации «За лучшие научные, научно – технические и инновационные разработки молодых ученых».

Результаты диссертационной работы переданы в Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси. Кроме того, результаты диссертационной работы применяются в ИРНИТУ и ИГУ при чтении курсов лекций «Интеллектуальные системы и технологии».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 1.2.2:

1. Массель Л.В., Массель А.Г., Щукин Н.И., **Цыбиков А.Р.** Разработка цифрового двойника ветровой электростанции: постановка задачи и проектирование // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. № 1 (25). С. 79-90. DOI:10.38028/ESI.2022.25.1.007

2. Оценка устойчивости энергетических систем с применением методов машинного обучения / Л. В. Массель, А. Г. Массель, **Цыбиков А.Р**., Т. Г. Мамедов [и др.] // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 248-261. – DOI 10.38028/ESI.2022.28.4.020. – EDN QIVLVY.

3. Построение цифровых двойников ветровой и солнечной электростанций на основе онтологического подхода / Л. В. Массель, А. Г. Массель, **А. Р. Цыбиков** [и др.] // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 7. – С. 28-32. – DOI 10.25728/avtprom.2022.07.04. – EDN BXCVJE.

4. Массель Л. В., **Цыбиков А. Р.**, Щукин Н. И. Методы построения умных цифровых двойников для проектирования возобновляемых источников энергии //

Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2026. – № 1(41). – С. 43-58. – DOI 10.25729/ESI.2026.41.1.003.

Статьи, индексируемые в Scopus и Web of Science

5. L. V. Massel, A. G. Massel and **A. R. Tsybikov**, Agent-Service Approach to Building Digital Twins // International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 411-415, doi: 10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10515552.

6. Massel L, Massel A, Shchukin N, **Tsybikov A.** Designing a Digital Twin of a Wind Farm. Engineering Proceedings. 2023; 33(1):30. https://doi.org/10.3390/engproc2023033030

7. Ludmila Massel, Nikita Shchukin and **Alexey Cybikov**. Digital twin development of a solar power plant // E3S Web of Conferences 289, 03005 (2021). Proc. of International Conference of Young Scientists “Energy Systems Research 2021”.

8. **A. R. Tsybikov**, L. V. Massel and A. G. Massel, "Technique for Building Digital Twins of Renewable Energy Sources," 2026 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), Sochi, Russian Federation, 2026, pp. 286-291, doi: 10.1109/SmartIndustryCon68821.2026.11493069.

Другие публикации

9. **Цыбиков, А. Р.** Разработка цифрового двойника солнечной электростанции с использованием онтологий / А. Р. Цыбиков, Н. И. Щукин, Л. В. Массель // Знания – Онтологии – Теории (ЗОНТ-2021): Материалы VIII Международный конференции, Новосибирск, 08–12 ноября 2021 года. – Новосибирск: Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, 2021. – С. 268-274. – EDN KUCFTO.

10. Массель А.Г., Щукин Н.И., **Цыбиков А.Р.** Разработка ЦД солнечной электростанции с использованием технологии BigData // Международный научно-технический конгресс «Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2021» («ИС & ИТ-2021» «IS&IT’21»). Научное издание. – Таганрог: Изд-во Ступина С.А. – 2021. – С. 598-605.

11. Массель Л.В., Массель А.Г., **Цыбиков А.Р**., Щукин Н.И. Построение цифровых двойников возобновляемых источников энергии // Труды Международной научно-практической конференции «Проблемы и решения эффективного использования альтернативных источников энергии». – Узбекистан, Фергана: Ферганский политехнический институт, 2023. – С. 68-75.

Свидетельства о регистрации баз данных и программ для ЭВМ

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021681401 Российская Федерация. Вычислительное ядро цифрового двойника солнечной электростанции: № 2021680672: заявл. 15.12.2021: опубл. 21.12.2021 / Л. В. Массель, А. Г. Массель, **А. Р. Цыбиков** [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. – EDN VETXQT.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022683763 Российская Федерация. Программа прогнозирования временных рядов для цифрового двойника солнечной электростанции с использованием LSTM-сетей: № 2022681766: заявл. 16.11.2022: опубл. 08.12.2022 / Л. В. Массель, А. Г. Массель, А. Р. Цыбиков, Н. И. Щукин; заявитель Федеральное государственное бюджетное

учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. – EDN DOEQQA.

14. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022620268 Российская Федерация. База данных цифрового двойника солнечной электростанции (DB DTSP): № 2021623049: заявл. 15.12.2021: опубл. 02.02.2022 / Л. В. Массель, А. Г. Массель, Н. И. Щукин, **А. Р. Цыбиков**; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. – EDN YNMOQU.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022682299 Российская Федерация. Вычислительное ядро цифрового двойника ветровой электростанции: № 2022681789: заявл. 16.11.2022: опубл. 21.11.2022 / Л. В. Массель, А. Г. Массель, **А. Р. Цыбиков**, Н. И. Щукин; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. – EDN LEWJBL.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686216 Российская Федерация. Компонент визуализации цифрового двойника ветровой электростанции: № 2024686216: заявл. 06.11.2024: опубл. 06.11.2024 / Л. В. Массель, А. Г. Массель, Н. И. Щукин, **А. Р. Цыбиков**; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686190 Российская Федерация. Программа для обработки математических формул и вычислений с использованием наборов данных цифрового двойника: № 2024685833: заявл. 06.11.2024: опубл. 06.11.2024 / Л. В. Массель, А. Г. Массель, **А. Р. Цыбиков**, Н. И. Щукин; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. – EDN DKKHSO.