

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата технических наук, доцента Исаева Сергея Владиславовича на диссертацию Цыбикова Алексея Ринчиновича «Методический подход к построению цифровых двойников энергетических объектов с применением моделей машинного обучения (на примере солнечной электростанции)», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.2.2.

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

1. Актуальность и общая характеристика диссертационной работы

Актуальность диссертационного исследования определяется развитием технологий цифровых двойников и интеллектуальных информационно-вычислительных систем, а также необходимостью совершенствования методов моделирования и прогнозирования для энергетических объектов с высокой зависимостью режимов работы от внешних условий. Для солнечных электростанций данная задача особенно значима, поскольку проектные и эксплуатационные характеристики существенно зависят от метеорологических параметров, а применение цифрового двойника требует согласованной работы математических моделей, данных, средств искусственного интеллекта и программной инфраструктуры.

Существенной особенностью исследования является то, что математические модели и алгоритмы машинного обучения не рассматриваются изолированно, а интегрируются в программную информационно-вычислительную среду цифрового двойника. Это делает вопросы организации данных, взаимодействия компонентов и воспроизводимости вычислительных экспериментов неотъемлемой частью оценки работы.

2. Основные научные результаты и их новизна

Научная новизна работы носит комплексный характер. Автором предложен методический подход к построению умного цифрового двойника солнечной электростанции (СЭС), объединяющий математические и семантические модели

с компонентами машинного обучения, построены агрегированная математическая модель СЭС и формализованная модель умного цифрового двойника, адаптирован численный метод ансамблирования моделей машинного обучения с динамическим выбором на основе состояния внешней среды, предложена методика формирования виртуальной среды для эмуляции данных, разработана агентно-сервисная архитектура и реализован программный комплекс – научный прототип цифрового двойника СЭС. Таким образом, научная новизна исследования определяется комплексным объединением средств математического и семантического моделирования, методов машинного обучения и программных компонентов в рамках единого подхода к построению умного цифрового двойника энергетического объекта. Существенным результатом является адаптация численного метода ансамблирования, обеспечивающего выбор модели прогнозирования с учетом текущего состояния внешней среды.

3. Теоретическая и практическая значимость полученных результатов

Теоретическая значимость исследования связана с развитием методических основ построения умных цифровых двойников энергетических объектов и способов интеграции математического моделирования, инженерии знаний и методов машинного обучения. Практическая значимость определяется возможностью применения предложенных решений при создании цифровых двойников солнечных электростанций, проведении вычислительных экспериментов, проектных расчетов и решении задач прогнозирования. Прикладная направленность подтверждается реализацией научного прототипа, передачей результатов в Институт энергетики НАН Беларуси, использованием отдельных результатов в образовательном процессе и наличием свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных.

4. Обоснованность и достоверность результатов работы

Достоверность представленных результатов обеспечивается использованием известных математических зависимостей при построении модели

СЭС, применением современных методов машинного обучения, вычислительными экспериментами и сравнением моделей по стандартным метрикам качества RMSE, MAE и R^2 . В работе используются реальные и эмулированные данные, а программная реализация связывает математическую модель, цифровую тень, виртуальную среду и интеллектуальные компоненты в едином контуре научного прототипирования.

Цель диссертационной работы сформулирована как разработка методического подхода к построению умных цифровых двойников энергетических объектов с использованием интеллектуальных технологий, в частности моделей машинного обучения. Поставленные задачи охватывают анализ существующих решений, построение математической и формализованной моделей, разработку и исследование метода динамического выбора моделей машинного обучения, формирование виртуальной среды, проектирование архитектуры и реализацию программного комплекса. Логика исследования в целом соответствует поставленной цели, а полученные результаты взаимосвязаны.

5. Апробация результатов и личный вклад автора

По материалам исследования опубликовано 17 работ, в том числе 4 публикации в рецензируемых научных изданиях по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, 4 работы, индексируемые в международных базах данных Scopus и (или) Web of Science. По результатам исследования получено 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных. Результаты диссертации прошли обширную апробацию на российских и международных конференциях.

Основные положения диссертационной работы, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, сформулированы как результаты, полученные лично автором. Программные компоненты и вычислительные эксперименты также выполнены при непосредственном участии соискателя.

6. Заключение о соответствии паспорту научной специальности

Диссертационная работа соответствует направлениям исследований паспорта научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки). Результаты работы соотносятся со следующими направлениями:

п. 2. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий (положения 1, 2, 3 научной новизны);

п. 3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента (положение 5 научной 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 научной новизны).

В диссертационном исследовании представлены все три составляющие научной специальности: математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

7. Краткая характеристика содержания диссертации

В первой главе выполнен анализ предметной области, рассмотрены особенности солнечной энергетики, современное состояние исследований в области цифровых двойников и возможности применения методов машинного обучения, включая рекуррентные нейронные сети, градиентный бустинг и ансамблевые подходы.

Во второй главе предложен методический подход к построению умного цифрового двойника, сформирована его формализованная модель, построена агрегированная математическая модель СЭС и рассмотрены вопросы интеграции математических, семантических и интеллектуальных компонентов. Здесь же

формализуется подход к выбору модели машинного обучения в зависимости от состояния внешней среды.

В третьей главе рассматриваются программная реализация научного прототипа, агентно-сервисная архитектура, виртуальная среда, организация данных и вычислительные эксперименты с моделями LSTM, GRU, XGBoost и алгоритмом EnvSwitch.

Полученные результаты представлены в логичной последовательности: от формирования концептуальной и математической основы цифрового двойника к разработке интеллектуального метода и его программной апробации.

8. Соответствие диссертации критериям «Положения о присуждении учёных степеней»

По п. 9. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития методов, моделей и программных средств интеллектуальной поддержки принятия решений в прогнозных исследованиях топливно-энергетического комплекса с позиции обеспечения энергетической безопасности.

По п. 10. Диссертация написана автором самостоятельно в виде рукописи, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, заслуживающие публичной защиты. Содержание диссертации и опубликованные работы свидетельствуют о достаточном вкладе автора в науку. Предложенные в диссертации решения аргументированы и оценены в сравнении с известными методами и подходами. В диссертации имеются сведения о практической полезности выполненных исследований, подтверждённые актами внедрения.

По п. 11–13. Основные научные результаты достаточно полно отражены в 17 опубликованных работах, в том числе в четырех статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

По п. 14. Диссертация соответствует указанным критериям.

9. Вопросы и замечания по содержанию диссертационной работы

1. В автореферате диссертации модель умного цифрового двойника (2) имеет вид: $SDT = (IM, MM, DB, VT, SE, RC, KB, VS, AIM)$, а в диссертации в той же модели (2.2) есть дополнительный компонент SD : $SDT = (IM, MM, DB, VT, SE, RC, SD, KB, VS, AIM)$ – какая из моделей используется в реальности?

2. При описании модели солнечной электростанции в формуле 2.5 вводится функция $p(t)$ – атмосферное давление, однако в дальнейшей работе она не применяется. Требуется пояснить ее необходимость в исходной модели.

3. В п. 2.5 рассматриваются два способа определения режимов функционирования внешней среды – на основе онтологических правил и с использованием кластеризации. Непонятно, каким образом объединяются полученные режимы. Следовало бы продемонстрировать, как формируются режимы при каждом из способов и каким образом результаты используются алгоритмом выбора модели.

4. На графиках, в частности на рисунках 3.18, 3.19 и 3.22, по оси X указан «временной индекс (часы)». При буквальной интерпретации данной подписи периодичность изменения инсоляции на отдельных графиках оказывается физически несогласованной: на одном масштабе она соответствует минутам, на другом – многолетнему интервалу. Вероятно, подпись оси нуждается в уточнении.

5. Одно из положений, характеризующих численный метод ансамблирования, связывает динамический выбор моделей с плавностью перехода между ними и повышением устойчивости прогноза. Вместе с тем в экспериментальной части плавность переходов между режимами и устойчивость прогноза показана недостаточно. Представляется необходимым уточнить, какие показатели или экспериментальные результаты подтверждают эти свойства метода.

6. Программный комплекс построен на агентно-сервисной архитектуре и объединяет цифровую модель, цифровую тень, базу данных, виртуальную среду и

интеллектуальные сервисы. В тексте диссертации хотелось бы видеть более явное описание механизмов обмена данными между этими компонентами, особенно при обновлении исходной информации и повторном выполнении расчетов.

Приведенные вопросы и замечания носят преимущественно уточняющий и дискуссионный характер. Они не снижают общей положительной оценки диссертационной работы и не затрагивают обоснованности основных результатов, выносимых на защиту.

10. Общее заключение

Диссертация Цыбикова Алексея Ринчиновича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой получены взаимосвязанные научные и практические результаты в области математического моделирования, численных методов и программной реализации цифровых двойников энергетических объектов (на примере солнечной электростанции). Работа характеризуется внутренним единством, а сформулированные выводы соответствуют поставленной цели и решенным задачам.

По своему содержанию, научной новизне, степени обоснованности результатов, теоретической и практической значимости диссертационная работа соответствует критериям пунктов 9–14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями и дополнениями). Основные результаты в достаточной мере опубликованы и апробированы, а автореферат соответствует содержанию диссертации.

Тематика и результаты исследования соответствуют научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки), включая направления, связанные с разработкой и тестированием вычислительных методов, их программной реализацией, компьютерным моделированием и проведением численных экспериментов.

Считаю, что Цыбиков Алексей Ринчинович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

Официальный оппонент:

кандидат технических наук, доцент,
заместитель директора Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения
Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук» по научной работе

(подпись)

Сергей Владиславович Исаев

Дата: «25» сентября 2026 г.

Почтовый адрес: 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 44;
тел.: +7 (391) 249-47-84; e-mail: si@icm.krasn.ru

Подпись Исаева Сергея Владиславовича удостоверяю.
Заместитель директора ИВМ СО РАН по научной работе,
кандидат физико-математических наук



(подпись)

Д.А. Нестеров

«25» сентября 2026 г.