TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
«National Research Tomsk Polytechnic University» (TPU)
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia
Tel. +7-3822-606333, +7-3822-701779,
Fax +7-3822-606444, https://tpu.ru
OKPO (National Classification of Enterprises and Organizations): 02069303,
Company Number: 1027000890168,
VAT/KPP (Code of Reason for Registration)
7018007264/701701001, BIC 016902004

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет» (ТПУ)
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия
тел.:+7-3822-606333, +7-3822-701779,
факс +7-3822-606444, https://tpu.ru
ОКПО 02069303, ОГРН 1027000890168,
ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 016902004

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке и стратегическим проектам,
кандидат физико-математических наук
А.С. Гоголев
«17» сентября 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу **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 темы диссертации

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.

Развитие возобновляемой энергетики сопровождается ростом требований к качеству проектирования, прогнозирования и информационного сопровождения энергетических объектов. В этой связи разработка цифровых двойников, способных объединять физические модели, данные и интеллектуальные методы, представляет актуальное направление исследований как для энергетики, так и для области математического моделирования и информационных технологий.

2. Научная новизна

Научная новизна работы носит комплексный характер. Автором предложен методический подход к построению умного цифрового двойника солнечной электростанции, 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.

В совокупности перечисленные результаты формируют единый подход, в котором интеллектуальные компоненты не выступают отдельным дополнением к цифровой модели, а включаются в структуру цифрового двойника и взаимодействуют с математической моделью, базой знаний, данными и виртуальной средой.

3. Структура и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа направлена на решение задачи формирования интегрированного методического подхода к построению умного цифрового двойника энергетического объекта. В качестве предметной области выбрана солнечная электростанция, для которой характерна выраженная зависимость выходных характеристик от состояния внешней среды. Автор последовательно рассматривает математическую модель объекта, семантическое описание предметной области, методы машинного обучения, виртуальную среду, цифровую тень и программную архитектуру.

Цель и задачи работы сформулированы последовательно и соответствуют заявленной теме. Полученные результаты охватывают три направления, непосредственно относящиеся к специальности 1.2.2: математическое моделирование, численные методы и разработку комплекса проблемно-ориентированных программ.

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. Кроме того, во второй главе описан численный метод ансамблирования моделей машинного обучения, предусматривающий выделение текущего состояния внешней среды и динамический выбор соответствующей модели прогнозирования из ансамбля. Такой подход позволяет учитывать изменение характеристик временного ряда при смене режима внешней среды. Практическая реализация метода выполнена в алгоритме EnvSwitch, результаты вычислительных экспериментов с которым представлены в третьей главе.

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.

В заключении обобщены результаты исследования. Структура диссертации соответствует логике поставленных задач, а содержание глав последовательно раскрывает переход от анализа предметной области к формализации моделей, разработке метода и его реализации в составе программного комплекса.

4. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

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.

5. Соответствие 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 вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий (положения 1, 2, 3 научной новизны).

П. 3. Реализация численных методов и алгоритмов в составе проблемно-ориентированных программ для вычислительного эксперимента (положение 5 научной новизны)

П. 9. Постановка и проведение численных экспериментов, и анализ их результатов 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.

6. 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.

Приведенные вычислительные эксперименты демонстрируют различие характеристик отдельных моделей при изменении объема обучающей выборки. В частности, на полном наборе данных алгоритм EnvSwitch показывает лучшие тестовые значения среди рассмотренных моделей, а на сокращенном наборе преимущество получает XGBoost. Такой результат корректно отражает зависимость эффективности методов прогнозирования от состава и объема доступных данных и подтверждает практическую целесообразность исследования адаптивного выбора моделей.

7. Апробация и публикации результатов диссертационной работы

Результаты исследования докладывались на российских и международных научных мероприятиях. По теме диссертации опубликованы 17 работ, в том числе 4 работы в рецензируемых изданиях по специальности 1.2.2 и 4 публикации, индексируемые в международных базах данных. Получены 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных. Результаты переданы в профильную научную организацию и используются в образовательном процессе, что подтверждает практическую направленность выполненной работы.

8. Соответствие диссертации критериям Положения о присуждении ученых степеней

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную автором самостоятельно и обладающую внутренним единством. В работе сформулированы и решены взаимосвязанные научно-технические задачи, получены новые научные результаты, имеющие теоретическое и практическое значение. Результаты исследования опубликованы и апробированы в достаточном объеме.

Диссертационная работа Цыбикова Алексея Ринчиновича соответствует критериям, установленным пунктами 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

9. Замечания

По работе имеются следующие замечания:

Положения, выносимые на защиту сформулированы достаточно расплывчато, мало конкретики:

Пункт 2. Не показано в чем отличие предлагаемой математической модели цифрового двойника солнечной электростанции (СЭС) от известных моделей и что дает ее применение по сравнению с аналогами. Также не сказано, в чем заключается модификация базовой модели цифрового двойника.

Пункт 3. Не показано в чем отличие предлагаемого численного метода от уже существующего подхода в области многомодельных систем и не приведены его такие характеристики, как устойчивость, сходимость, погрешность.

Пункты1-5. Нет ни качественных, ни количественных показателей, характеризующих результативность применения разработанных подходов, моделей и методов.

Предлагаемая в работе математическая модель цифрового двойника солнечной электростанции представлена перечнем известных формул, характеризующих процесс преобразования солнечной энергии в электрическую. Возникает вопрос - в чем новизна данной модели и какие преимущества она имеет перед уже существующими моделями? Также не понятно, о каком множестве допустимых моделей СЭС говорит автор (см. выражение (2.17) из диссертации).

По ходу изложения работы автор вначале говорит об адаптации численного метода ансамблирования моделей машинного обучения в виртуальной среде цифрового двойника СЭС, а затем уже претендует на разработку нового оригинального метода ансамблирования моделей машинного обучения, который по

сути отличается от существующих методов лишь применением онтологий. При этом отсутствуют какие - либо количественные оценки (точность, погрешность) сравнения с уже известными методами, не оценивается устойчивость и сходимость нового метода.

Не приведены количественные оценки для сравнения результатов прогнозирования инсоляции разработанным методом с результатами известных ранее методов ансамблирования моделей машинного обучения.

В целом отмеченные недостатки не снижают качество исследования, не влияют на полученные конечные результаты и положительную оценку диссертационной работы.

10. Заключение ведущей организации

Диссертация Цыбикова Алексея Ринчиновича «Методический подход к построению цифровых двойников энергетических объектов с применением моделей машинного обучения (на примере солнечной электростанции)» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой решена важная научно-практическая задача разработки методического подхода к построению и реализации цифрового двойника солнечной электростанции. Полученные результаты обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью, а содержание диссертации соответствует поставленной цели и сформулированным задачам.

Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы и достаточно полно отражает ее основные научные и практические результаты. Диссертация соответствует критериям, установленным пунктами 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями и дополнениями), и требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Ведущая организация считает, что Цыбиков Алексей Ринчинович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв принят на заседании научно-технического совета Инженерной школы информационных технологий и робототехники (ИШИТР) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ).

Присутствовало на заседании 8 чел. Результаты голосования: «за» 7 - чел., «против» - 1чел., «воздержалось» - нет, протокол № 4 от «10» сентября 2026г.

Председатель научно-технического совета ИШИТР,
Кочегуров А. И., канд.техн.наук., доцент ОИТ* ИШИТР ТПУ подпись

Секретарь научно-технического совета ИШИТР,
Небаба С. Г., канд.техн.наук. доцент ОИТ ИШИТР ТПУ подпись

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»
Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Телефон: +7 (3822) 606333
E-mail: tpu@tpu.ru

* Отделение информационных технологий

Ученый секретарь ТПУ

В. Д. Новикова