

ОТЗЫВ

официального оппонента – доктора технических наук, доцента **Вохминцева**

Александра Владиславовича на диссертационную работу

Цыбикова Алексея Ринчиновича на тему «**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 выбранной темы обусловлена необходимостью повышения качества моделирования и прогнозирования режимов энергетических объектов, функционирование которых существенно зависит от изменяющихся внешних условий. Для солнечных электростанций эта зависимость проявляется особенно заметно, что делает востребованными подходы, способные учитывать неоднородность метеорологических режимов и адаптировать используемые модели к текущему состоянию среды.

В этом отношении представляет интерес предложенная в диссертации идея включения в состав цифрового двойника интеллектуального компонента, осуществляющего выбор модели машинного обучения в зависимости от режима внешней среды. Такое решение связывает задачи математического моделирования и анализа данных с задачей адаптивного прогнозирования и соответствует современному направлению развития интеллектуальных цифровых двойников.

2. Научная новизна

К наиболее существенным результатам, определяющим научную новизну диссертационной работы, следует отнести предложенный численный метод ансамблирования моделей машинного обучения с динамическим выбором модели на основе состояния внешней среды. Данный результат реализован автором в алгоритме EnvSwitch и включен в более общий методический подход к

построению умного цифрового двойника солнечной электростанции. Наряду с этим автором построены агрегированная математическая модель СЭС и формализованная модель цифрового двойника, предложена методика формирования виртуальной среды для эмуляции данных, разработана агентно-сервисная архитектура и создан научный прототип программного комплекса.

3. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Теоретическая значимость работы состоит в развитии подходов к совместному применению математического моделирования и методов машинного обучения при построении интеллектуальных цифровых двойников. Вкладом автора в науку является рассмотрение процедуры выбора прогнозной модели как составной части вычислительного метода, зависящей от текущего режима внешней среды. Практическая значимость определяется возможностью использования предложенного подхода и алгоритма EnvSwitch в задачах прогнозирования характеристик солнечной электростанции, а также реализацией соответствующих решений в составе прототипа программной системы. Прикладная направленность подтверждается апробацией результатов в Институте 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

Обоснованность полученных результатов обеспечивается построением математической модели исследуемого объекта, использованием известных методов машинного обучения и проведением серии вычислительных экспериментов. Для сопоставления моделей глубокого обучения применяются стандартные метрики RMSE, MAE и R^2 , что позволяет оценивать качество прогнозирования по нескольким критериям. Отдельное значение имеет сравнительное исследование LSTM, GRU, XGBoost и алгоритма EnvSwitch на наборах данных различного размера, позволяющее оценить условия, при которых динамический выбор моделей дает преимущество по сравнению с использованием одной модели.

Цель диссертационного исследования достигается за счет решения взаимосвязанного набора задач: от анализа цифровых двойников и построения математической модели солнечной электростанции до разработки численного метода динамического выбора моделей, формирования виртуальной среды и программной реализации.

5. Апробация и личный вклад автора

Результаты исследования представлены в 17 публикациях, включая работы в рецензируемых научных изданиях по специальности 1.2.2 и публикации, индексируемые в международных наукометрических базах данных. Основные положения диссертации апробированы на российских и международных научных конференциях. Все представленные в диссертационной работе научные результаты получены автором самостоятельно, что позволяет высоко оценить его личный вклад в представленном научном исследовании.

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 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.

7. Анализ содержания диссертационной работы

Первая глава формирует теоретическую и предметную основу исследования. В ней рассмотрены особенности функционирования солнечных электростанций, подходы к построению цифровых двойников и методы машинного обучения, потенциально применимые для прогнозирования, такие как рекуррентные нейронные сети, градиентный бустинг и ансамблевые схемы. Такой всесторонний анализ подводит к постановке задачи адаптивного выбора модели при изменении условий внешней среды.

Во второй главе представлены основные методические и алгоритмические результаты. Автор описывает модель умного цифрового двойника, строит агрегированную математическую модель СЭС и описывает взаимодействие математических, семантических и интеллектуальных компонентов. Здесь же рассматривается численный метод ансамблирования, в котором выбор прогнозной модели определяется состоянием внешней среды; рассматривается использование онтологических правил и кластеризации для выделения соответствующих режимов.

Третья глава посвящена вычислительной и программной апробации предложенных решений. Рассматриваются научный прототип цифрового двойника, виртуальная среда и агентно-сервисная архитектура, после чего приводятся эксперименты с LSTM, GRU, XGBoost и EnvSwitch. Сопоставление результатов на различных размерах коллекций данных позволяет оценить качество работы моделей и предложенного автором алгоритма в разных условиях.

8. Вопросы и замечания по содержанию диссертационной работы

1. В исследовании при постановке задач диссертационной работы и при проведении экспериментов основной акцент автором был сделан на повышении метрик качества работы предложенного метода, но детально не был изучен вопрос повышения производительности ансамбля моделей машинного обучения. Вместе с тем, известно, что ансамбли часто дают лучшую точность и устойчивость, но вместе с тем отличаются высокой вычислительной сложностью при решении

реальных прикладных задач, а также требуют больших вычислительных затрат при подборе гиперпараметров.

2. Ансамбли моделей машинного обучения характеризует низкая степень интерпретируемости полученных результатов. В последнее время, для устранения данного недостатка ансамблей активно используются методы теории игр, суррогатные деревья или репрезентативные деревья, которые могут либо показать, какие признаки важны и как именно они влияют на результат, либо позволяют найти дерево (или группу деревьев), которые наиболее похожи на поведение всего леса. В работе, не были рассмотрены вопросы повышения степени интерпретируемости создаваемой модели, что критически важно для использования в сфере энергетики.

3. В методе EnvSwitch состояние внешней среды определяется как на основе онтологических экспертных правил, так и посредством кластеризации нормализованных признаков. В работе было бы полезно явно сформулировать критерии выбора между этими двумя способами и показать, насколько итоговый выбор модели прогнозирования чувствителен к границам выделенных режимов.

4. На полном наборе данных метод EnvSwitch демонстрирует лучшие тестовые показатели среди рассмотренных моделей, тогда как на сокращенной выборке данных (из 20 000 значений) метод XGBoost показывает лучшие результаты. В связи с этим видится целесообразным введение критерия, по которому можно сделать выбор между применением динамического ансамбля, либо качественно обученной моделью на полной коллекции данных.

5. Веса моделей в ансамбле формируются на основе значения метрики RMSE, при этом оценка качества работы моделей производится также по другим метрикам, таким как MAE и R^2 . Необходимо обосновать выбор метрики RMSE в качестве основной метрики в работе и дать оценку динамике весов при использовании других метрик качества.

6. Каким образом в работе учитывается несбалансированность числа наблюдений в различных режимах внешней среды и не приводит ли малое число

примеров для отдельного режима к нестабильному выбору специализированной модели?

7. В экспериментальной части исследования используется ансамбль моделей машинного обучения формируется на основе LSTM, GRU и XGBoost, однако в диссертации не обоснован в достаточной мере состав такого ансамбля моделей, является ли предложенный численный метод ансамблирования независимым от конкретного набора базовых моделей?

Высказанные замечания относятся главным образом к направлениям дальнейшего исследования, а также уточнению условий применения предложенного численного метода. Представленные замечания не изменяют общей положительной оценки выполненного автором диссертационного исследования.

9. Общее заключение

Диссертация Цыбикова Алексея Ринчиновича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на современном научном уровне, в которой решена актуальная научно-техническая задача разработки методического подхода к построению цифровых двойников энергетических объектов на основе совместного применения методов математического моделирования, интеллектуальных технологий и программных средств. Полученные автором результаты обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью.

Диссертационная работа отвечает критериям пунктов 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями и дополнениями). Работа выполнена автором самостоятельно, обладает внутренним единством и содержит новые научные результаты. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в рецензируемых научных изданиях и прошли необходимую апробацию. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

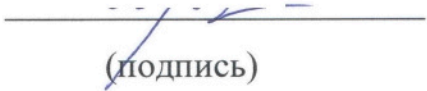
Содержание и полученные результаты соответствуют научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки) и направлениям исследований, определенным паспортом данной научной специальности.

Считаю, что диссертационная работа Цыбикова Алексея Ринчиновича «Методический подход к построению цифровых двойников энергетических объектов с применением моделей машинного обучения (на примере солнечной электростанции)» соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, доцент,
заведующий научно-исследовательской лабораторией «Интеллектуальные информационные технологии и системы»
ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет»

Александр Владиславович Вохминцев


(подпись)

Почтовый адрес: 454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, д. 129

Телефон: +7 (351) 799-72-88

E-mail: vav@csu.ru

Дата: «21»  2026 г.



ОТДЕЛА КАДРОВ
АКУТИНА В.И.