

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Цыбикова Алексея Ринчиновича «Методический подход к построению цифровых двойников энергетических объектов с применением моделей машинного обучения (на примере солнечной электростанции)»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертационная работа Цыбикова А.Р. посвящена актуальной и практически значимой проблеме – разработке методического подхода к построению умных цифровых двойников (УЦД) энергетических объектов. Актуальность темы не вызывает сомнений, поскольку цифровые двойники являются ключевым элементом четвертой промышленной революции и активно внедряются в энергетике для повышения эффективности проектирования, эксплуатации и прогнозирования работы оборудования. Особую значимость работа приобретает в контексте развития возобновляемой энергетики, где задачи оптимизации генерации и снижения затрат на обслуживание становятся критически важными. Автор справедливо отмечает, что, несмотря на наличие отдельных исследований, комплексный подход к построению УЦД, объединяющий математическое моделирование, онтологический инжиниринг и методы машинного обучения, проработан недостаточно.

Научная новизна работы заключается в разработке целостного методического подхода, включающего:

- формализованную модель умного цифрового двойника, расширяющую классическое определение за счет включения баз знаний, виртуальной среды и моделей искусственного интеллекта (формула 2);
- агрегированную математическую модель солнечной электростанции (СЭС), пригодную для интеграции в вычислительное ядро цифрового двойника (формулы 6–14);
- оригинальный численный метод ансамблирования моделей машинного обучения с динамическим выбором на основе состояния внешней среды (EnvSwitch);
- методику построения виртуальной среды для эмуляции данных на этапе прототипирования;
- агентно-сервисную архитектуру и программную реализацию научного прототипа УЦД СЭС.

Особого внимания заслуживает предложенный автором метод EnvSwitch. В отличие от классических ансамблевых подходов, он предполагает не усреднение прогнозов всех моделей, а динамический выбор наилучшей модели (или их комбинации) в зависимости от текущего режима внешней среды (например, «ясное утро», «облачная погода», «зимняя ночь»). Режимы идентифицируются как на основе экспертных правил, формализованных в онтологии, так и автоматически – с помощью кластеризации. Такой подход обеспечивает адаптивность прогнозирования и повышает его точность в нестационарных условиях, что подтверждается результатами вычислительных экспериментов. На полном наборе данных метод EnvSwitch показал наилучшие результаты ($RMSE = 38,09$, $R^2 = 0,96$) по сравнению с отдельными моделями LSTM, GRU и XGBoost.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методологии построения цифровых двойников за счет интеграции интеллектуальных технологий и

формализации процессов их взаимодействия. Практическая ценность подтверждена реализацией программного комплекса – научного прототипа УЦД СЭС, который может использоваться для проектирования, прогнозирования выработки и отладки систем управления. Получены шесть свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных, что свидетельствует о высокой степени практической проработки результатов. Результаты внедрены в учебный процесс ИРНИТУ и ИГУ, а также переданы в Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси.

Структура автореферата логична и отражает ключевые этапы исследования. Достоверность результатов обеспечивается корректным применением математического аппарата, использованием реальных и эмулированных данных, а также сравнительным анализом моделей по стандартным метрикам качества.

В качестве замечаний и пожеланий можно отметить следующее:

1. В работе рассматривается прогнозирование солнечной радиации как один из ключевых факторов генерации СЭС. Однако не уточнено, как метод EnvSwitch адаптируется для прогнозирования непосредственно выходной мощности СЭС, которая зависит не только от радиации, но и от температуры, скорости ветра и состояния оборудования.

2. Автор отмечает, что метод EnvSwitch показал снижение точности на сокращенном наборе данных (20 000 значений) по сравнению с XGBoost. Хотелось бы увидеть более детальный анализ причин этого явления и возможные пути повышения робастности метода при ограниченных выборках.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком уровне, содержащее новые научные результаты и имеющее практическую ценность. Основные положения работы достаточно полно отражены в 17 публикациях, включая 4 статьи в журналах из перечня ВАК и 4 публикации, индексируемые в Scopus и Web of Science.

Считаю, что диссертационная работа Цыбикова Алексея Ринчиновича соответствует требованиям п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Сведения об авторе отзыва:

Зорина Татьяна Геннадьевна
доктор экономических наук, профессор
Заведующий лабораторией «Устойчивое
энергетическое развитие»
РНПУП «Институт энергетики
Национальной академии наук Беларуси
220072, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Академическая, 15, корп. 2,
тел. +375 17 2576472, ire@ipe.by



Зорина Т.Г.

*Подпись завершено
Подпись специалиста по кадровой*

Лове Е.Р.