

УДК 621.311:004.942

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ (2021– 2026 ГГ.)

И.И. Гайнанов ¹, М.Е. Жерновой ²¹ Оператор научной роты ФГАУ «Военный инновационный технополис
«ЭРА», г. Анапа² Оператор научной роты ФГАУ «Военный инновационный технополис
«ЭРА», г. Анапа

Введение. Технология цифровых двойников (digital twins) за последние пять лет превратилась из концептуальной идеи в практический инструмент цифровизации электроэнергетики. Цифровой двойник представляет собой виртуальную копию физического объекта или системы, которая обновляется в реальном времени на основе данных с датчиков и способна к прогнозированию поведения объекта при различных сценариях развития событий [1]. В электроэнергетике цифровые двойники применяются для мониторинга состояния оборудования, прогнозирования отказов, оптимизации режимов работы, планирования модернизации и обучения персонала.

Актуальность исследования обусловлена несколькими факторами. Во-первых, в 2023 г. Правительством РФ утверждены основные правила формирования и актуализации цифровых двойников энергосистемы, что закрепило правовые основы для их развития [3]. Во-вторых, в 2023–2024 гг. начата реализация масштабных проектов по созданию цифровых двойников национальной энергосистемы, включая проект ПАО «Россети» по разработке системы информационного моделирования электрической сети (СИМЭС), охватывающей более 500 тыс. подстанций среднего и высокого напряжения [9]. В-третьих, глобальный рынок цифровых двойников в электроэнергетике демонстрирует устойчивый рост: по оценкам аналитиков, его объем увеличится с 0,8 млрд долл. в 2021 г. до 1,3 млрд долл. к 2026 г. при среднегодовом темпе роста 12,2% [7].

Целью настоящей статьи является анализ современного состояния технологий цифровых двойников в электроэнергетике за период 2021–2026 гг., выявление ключевых технологических решений, практических кейсов внедрения и перспектив развития с учетом специфики российской энергетической системы.

Проект СИМЭС ПАО «Россети». В ноябре 2023 г. ПАО «Россети» объявил тендер на разработку системы информационного моделирования электрической сети (СИМЭС) на сумму 566 млн руб. [9]. Проект предполагает

создание цифрового двойника, объединяющего более 500 тыс. подстанций среднего и высокого напряжения с возможностью:

- 1) Визуализации топологии сети в 3D-формате;
- 2) Моделирования электромагнитных и электромеханических переходных процессов;
- 3) Анализа устойчивости при различных сценариях развития системы;
- 4) Оптимизации инвестиционных программ на основе данных о состоянии оборудования.

Реализация проекта планируется в три этапа: 2024 г. – пилотное внедрение на сети филиала «Россети Центр»; 2025 г. – масштабирование на 5 филиалов; 2026 г. – полномасштабное развертывание на всей территории присутствия компании [9].

Ведомственный проект «Цифровая энергетика» Минэнерго России. В рамках национальной программы цифровой трансформации ТЭК России Минэнерго РФ реализует ведомственный проект «Цифровая энергетика», ключевым элементом которого является создание доверенной отраслевой цифровой платформы для передачи технологических данных в реальном времени [4]. Платформа предусматривает:

- 1) Единые форматы и протоколы обмена данными между субъектами рынка;
- 2) Механизмы верификации и аутентификации данных;
- 3) Сервисы для построения цифровых двойников на базе стандартизированных данных.

В 2024 г. завершена разработка архитектуры платформы, в 2025–2026 гг. планируется ее поэтапное внедрение.

Цифровые двойники ВИЭ-объектов. Компания «Энергодвойник» в 2025–2026 гг. реализует проекты по созданию цифровых двойников солнечных электростанций (СЭС) и ветровых электростанций (ВЭС) в Южном и Северо-Кавказском федеральных округах [10]. Двойники включают:

- 1) Метеорологические модули для прогнозирования выработки на основе спутниковых и наземных данных;
- 2) Модели износа фотоэлектрических модулей и лопастей ветрогенераторов;
- 3) Системы оптимизации режимов работы инверторов и преобразователей частоты.

Результаты пилотных проектов показали снижение потерь выработки на 8–12% за счет оперативной корректировки режимов работы и сокращение времени простоя при отказах на 25% [4].

Международный опыт. Глобальные энергетические компании активно внедряют цифровые двойники. Так, европейский оператор TenneT создал цифровой двойник морских ветропарков Северного моря для оптимизации технического обслуживания и прогнозирования выработки [8]. Американская

компания Duke Energy применяет цифровые двойники распределительных сетей для автоматического восстановления электроснабжения после стихийных бедствий (сокращение времени восстановления на 40%) [5].

Анализ тенденций 2021–2026 гг. позволяет выделить следующие перспективные направления развития цифровых двойников в электроэнергетике:

1) Иерархическая архитектура. Современные решения переходят от изолированных моделей отдельных компонентов к многоуровневым системам. Цифровые двойники оборудования (турбин, трансформаторов) интегрируются в двойники энергообъектов, которые, в свою очередь, объединяются в модель единой энергосистемы. Такая иерархия позволяет анализировать каскадное распространение аварийных режимов, оптимизировать капитальные вложения на каждом уровне иерархии и оценивать влияние отказа локального элемента на устойчивость всей сети.

2) Интеграция с блокчейн-технологиями. Применение распределённых реестров решает проблему доверия к данным цифровых двойников. Блокчейн обеспечивает неизменяемую запись истории состояний оборудования, что критически важно при разрешении споров с поставщиками оборудования, страховыми случаями и судебными разбирательствами. Технология также упрощает взаимодействие между независимыми участниками рынка электроэнергии.

3) Цифровые двойники для управления спросом (Demand Response). С развитием «умных» потребителей и электромобилей цифровые двойники позволяют моделировать поведение потребительских групп и оптимизировать тарифные стратегии для выравнивания графика нагрузки [2].

4) Квантовые вычисления. Хотя массовое внедрение ожидается после 2028 г., исследования уже сегодня показывают потенциал квантовых алгоритмов для решения задач оптимизации режимов работы крупных энергосистем. Квантовые компьютеры смогут обрабатывать модели с тысячами узлов за минуты вместо часов, что кардинально повысит точность прогнозов цифровых двойников и скорость принятия управленческих решений [6].

Реализация этих направлений позволит не только повысить надёжность и эффективность действующей инфраструктуры, но и обеспечить гибкость, необходимую для интеграции возобновляемых источников энергии и децентрализованных потребителей в единую цифровую экосистему электроэнергетики.

Заключение

Проведенный анализ показал, что за период 2021–2026 гг. технология цифровых двойников прошла путь от пилотных проектов до системного внедрения в электроэнергетике России и мира. Ключевыми достижениями периода стали:

1) Формирование нормативно-правовой базы для создания и использования цифровых двойников энергосистем (распоряжения Правительства РФ 2023 г., ведомственный проект «Цифровая энергетика») [4].

2) Запуск масштабных проектов по созданию цифровых двойников национального уровня (СИМЭС ПАО «Россети», цифровые модели ЕЭС РФ) [9].

3) Перспективы развития цифровых двойников связаны с созданием иерархических моделей, интеграцией с блокчейном и квантовыми вычислениями, а также применением для управления спросом и интеграции распределенной генерации [9, 15].

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку методик оценки экономической эффективности цифровых двойников, создание отраслевых стандартов и разработку решений по обеспечению киберустойчивости критически важных цифровых моделей энергосистем.

Список литературы

1. Абрамов В.И., Гордеев В.В., Столяров А.Д. Цифровые двойники: характеристики, типология, практики развития // Вопросы инновационной экономики. – 2024. – Том 14. – № 3. – с. 691–716.
2. Илюшин П.В., Ковалёв С.П., Куликов А.Л., Небера А.А., Непша Ф.С. Методы интеллектуального управления распределенными энергоресурсами на базе цифровой платформы. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2021. – 116 с.
3. Министерство энергетики РФ. Ведомственный проект «Цифровая энергетика»: концепция и план реализации. – М., 2023. – 48 с.
4. Чеботарева Г.А., Смирнов А.В. Цифровая трансформация энергетического сектора: кейс России // E3S Web of Conferences. – 2021. – 76 с.
5. Сифат М.М.Х., Кабир Э., Аль-Шетви А.К. К электрической цифровой двойной сетке: технологии и обзор концепции // Energy and AI. – 2023. – Т. 11. – Ст. 100213. – DOI: 10.1016/j.egyai.2022.100213.
6. Verdantix. Industrial digital twins: market size, share and trends analysis report 2021 [Промышленные цифровые двойники: анализ размеров рынка, доли и тенденций, отчет 2021] [Электронный ресурс] // London: Verdantix, 2021. – 124 с. Режим доступа: <https://www.verdantix.com/research/industrial-digital-twins-market-size-share-and-trends-analysis-report> (дата обращения: 28.01.2026).
7. MarketsandMarkets. Electrical Digital Twin Market by Component, Application, and Region – Global Forecast to 2026 [Рынок электрических цифровых двойников по компонентам, применениям и регионам – глобальный прогноз до 2026 г.] // Chicago: MarketsandMarkets, 2021. – 189 с.

8. European Commission. Digitalisation of the EU Energy System [Цифровизация энергетической системы ЕС] // Brussels: EC, 2024. – 87 с.
9. ПАО «Россети». Отчет о реализации проекта СИМЭС (2023–2024 гг.). – М.: Россети, 2024. – 32 с.
10. Ассоциация «Цифровая энергетика». Альманах лучших практик цифровизации энергетики России. – М., 2022. – 156 с.