

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К СОЗДАНИЮ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Цыпкина Виктория Вячеславовна, Иванова Вера Павловна Пирназарова
Сарбиназ Сарсенбаевна, Аминов Руслан Дмитриевич.**

Аннотация: В работе рассматриваются теоретические и прикладные аспекты разработки цифровых двойников в промышленности с акцентом на кабельное производство. Проведен анализ современных подходов к построению цифровых двойников технологического оборудования, их архитектуры и функциональных возможностей в рамках концепции Industry 4.0. Особое внимание уделено применению цифровых двойников для мониторинга технического состояния, прогнозирования отказов, оптимизации режимов работы и повышения эффективности производственных процессов. Обоснована актуальность разработки цифрового двойника кабельной машины общего типа, учитывающего конструктивные особенности оборудования, динамику взаимодействия функциональных узлов и нелинейный характер технологических процессов. Показано, что внедрение цифровых двойников позволяет повысить надежность эксплуатации оборудования, снизить эксплуатационные затраты и обеспечить переход к интеллектуальным системам управления производством.

Ключевые слова: цифровой двойник, кабельная машина, Industry 4.0, киберфизические системы, предиктивная диагностика, техническое состояние, математическое моделирование, интеллектуальные системы управления, промышленный интернет вещей; оптимизация производственных процессов.

Введение

Современный этап развития промышленного производства характеризуется переходом к интеллектуальным киберфизическим системам, основанным на интеграции физических объектов, вычислительных моделей и цифровых технологий обработки данных. В рамках концепции «Индустрия 4.0» особое значение приобретают технологии цифровых двойников (ЦД), обеспечивающие непрерывное взаимодействие между реальным оборудованием и его виртуальной моделью в режиме реального времени.

Цифровой двойник представляет собой динамическую математическую и информационную модель объекта, способную воспроизводить его текущее состояние, прогнозировать поведение и поддерживать принятие управленческих решений на основе анализа данных мониторинга. В отличие от традиционных расчетных моделей, ЦД функционирует в условиях постоянного обновления параметров, что позволяет учитывать изменения состояния оборудования, влияние внешних факторов и деградационные процессы.

Актуальность применения цифровых двойников в промышленности обусловлена необходимостью повышения надежности оборудования, снижения эксплуатационных затрат, оптимизации энергопотребления и повышения эффективности технологических процессов. Особенно это актуально для сложных электромеханических систем, к которым относятся кабельные машины, характеризующиеся многосвязной структурой, нелинейной динамикой и высокой чувствительностью к изменениям режимов работы.

Несмотря на значительный прогресс в области цифрового моделирования промышленного оборудования, существующие решения в большинстве случаев ориентированы на отдельные узлы или частные технологические процессы и не обеспечивают комплексного представления объекта как единой системы. Это ограничивает возможности их применения для задач сквозного анализа, диагностики и оптимизации.

В связи с этим возникает необходимость систематизации существующих подходов к созданию цифровых двойников промышленного оборудования, анализа их преимуществ и ограничений, а также обоснования выбора наиболее перспективной архитектуры для построения цифрового двойника кабельной машины общего типа. Полученные результаты являются основой для разработки комплексной математической модели и последующей реализации интеллектуальной системы мониторинга и управления.

Обзорная часть. Развитие концепции цифровой трансформации промышленности привело к широкому внедрению технологий цифровых двойников в различных отраслях производства. Цифровой двойник (ЦД) представляет собой виртуальную модель физического объекта, процесса или системы, способную воспроизводить их текущее состояние, прогнозировать поведение и поддерживать принятие решений на основе анализа данных, поступающих в режиме реального времени. Такая модель формируется за счёт интеграции инженерных данных, сенсорной информации и вычислительных алгоритмов, что обеспечивает высокую степень соответствия цифрового представления реальному объекту.

В современных условиях цифровые двойники рассматриваются как важный элемент цифровой экосистемы предприятия. Они позволяют не только отслеживать текущее состояние оборудования, но и выявлять потенциальные отклонения в его работе на ранних стадиях. Это особенно актуально для сложных технических систем, где отказ одного элемента может привести к значительным экономическим потерям или остановке производственного процесса.

В рамках концепции «Индустрия 4.0» цифровые двойники выступают одним из ключевых инструментов повышения эффективности эксплуатации оборудования, сокращения эксплуатационных затрат и перехода к интеллектуальным системам управления производственными процессами. Их применение способствует оптимизации производственных циклов, повышению качества продукции и снижению влияния человеческого фактора на критически важные операции.

Кроме того, использование ЦД позволяет объединить математические модели, данные датчиков, системы автоматизации и методы анализа больших данных в единую цифровую среду. Это обеспечивает возможность комплексного анализа поведения объекта в различных условиях эксплуатации, а также проведение виртуальных экспериментов без остановки реального производства.

Таким образом, цифровые двойники становятся основой для создания гибких, адаптивных и самообучающихся производственных систем. Их дальнейшее развитие связано с интеграцией технологий искусственного интеллекта, машинного обучения и облачных вычислений, что открывает новые перспективы для повышения уровня автоматизации и интеллектуализации промышленности.

В условиях цифровой трансформации промышленности и активного внедрения концепции «Индустрия 4.0» возникает необходимость разработки и эффективного применения цифровых двойников для промышленных объектов и производственных процессов. Несмотря на значительный прогресс в этой области, остаются нерешёнными вопросы, связанные с обеспечением высокой точности моделирования, своевременной синхронизацией виртуальной модели с реальным объектом, а также интеграцией разнородных источников данных в единую информационную среду.

Целью проводимых исследований являлось изучение принципов построения и функционирования цифровых двойников в промышленности, а также анализ их роли в повышении эффективности управления производственными системами. Особое внимание уделяется вопросам обработки данных в режиме реального времени, построения математических моделей и использования методов анализа больших данных для прогнозирования состояния оборудования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: рассмотреть основные подходы к созданию цифровых двойников, изучить их архитектуру и ключевые компоненты, проанализировать методы интеграции данных с датчиков и систем автоматизации, а также оценить возможности применения технологий искусственного интеллекта для повышения точности прогнозирования.

Дополнительно требуется исследовать практические аспекты внедрения цифровых двойников на промышленных предприятиях, включая экономическую эффективность, влияние на снижение эксплуатационных затрат и повышение надёжности оборудования. Важным является также анализ ограничений и проблем, возникающих при реализации таких систем.

В результате выполнения поставленных задач предполагается сформировать целостное представление о цифровых двойниках как инструменте интеллектуального управления промышленными процессами и определить перспективные направления их дальнейшего развития.

Методы реализации поставленной задачи. Существующие подходы к созданию ЦД промышленного оборудования можно условно разделить на три основные

группы: модельно-ориентированные, данные-ориентированные и гибридные (таблица 2).

Модельно-ориентированный подход (МОП): основан на использовании математических моделей, описывающих физические процессы, протекающие в объекте исследования. Такие модели формируются на основе фундаментальных законов механики, электротехники, гидравлики, теплотехники и других инженерных дисциплин.

Основными преимуществами данного подхода являются высокая интерпретируемость результатов, возможность анализа причинно-следственных связей и применение модели на этапе проектирования оборудования. Кроме того, математическая модель позволяет исследовать режимы работы, для которых отсутствуют экспериментальные данные.

К недостаткам следует отнести сложность построения адекватной модели для сложных технических систем, необходимость точного определения параметров объекта и значительные трудозатраты на разработку.

Данные-ориентированный подход (ДОП) основан на использовании методов обработки больших массивов данных, получаемых от датчиков и систем мониторинга оборудования. В качестве инструментов анализа применяются методы машинного обучения (ММО), искусственного интеллекта (ИИ) и статистического моделирования.

Основным преимуществом данного подхода является способность выявлять скрытые зависимости между параметрами системы без необходимости детального описания физических процессов. Такие модели хорошо адаптируются к изменению условий эксплуатации и позволяют эффективно решать задачи прогнозирования технического состояния оборудования.

Недостатком является высокая зависимость качества модели от объема и достоверности исходных данных. Кроме того, многие алгоритмы машинного обучения функционируют по принципу «черного ящика», что затрудняет интерпретацию полученных результатов.

Гибридный подход (ГП) сочетает преимущества математического моделирования и методов анализа данных. В этом случае физическая модель объекта дополняется алгоритмами машинного обучения (МО), обеспечивающими уточнение параметров модели и адаптацию к изменяющимся условиям эксплуатации.

В настоящее время гибридные ЦД считаются наиболее перспективным направлением развития интеллектуальных систем мониторинга и управления промышленным оборудованием. Они обеспечивают высокую точность моделирования, устойчивость к изменениям режимов работы и возможность прогнозирования технического состояния объекта.

Сравнительный анализ подходов к построению цифровых двойников

Таблица 1

Подход	Принцип построения	Преимущества	Недостатки
Модельно-ориентированный	Основан на математическом описании физических процессов объекта	Высокая интерпретируемость результатов; возможность анализа причинно-следственных связей; применение на этапе проектирования	• сложность разработки; • необходимость точного определения параметров модели; • высокая трудоемкость
Данные-ориентированный	Основан на обработке данных, поступающих от датчиков и систем мониторинга	Высокая адаптивность; возможность выявления скрытых закономерностей; эффективное прогнозирование	Требует больших объемов данных; зависимость от качества измерений; ограниченная интерпретируемость результатов
Гибридный	Сочетает математические модели и методы анализа данных	Высокая точность моделирования; учет физических закономерностей и реальных эксплуатационных данных; адаптация к изменениям режима работы	Более сложная реализация; необходимость интеграции различных методов моделирования

Проведенный анализ (таблица 2) показал, что для построения ЦД КМ общего типа наиболее перспективным является ГП, объединяющий преимущества математического моделирования и анализа данных. Такой подход позволяет учитывать как физические особенности функционирования оборудования, так и информацию, получаемую от системы мониторинга в режиме реального времени.

Полученные результаты. Применение цифровых двойников (ЦД) в промышленности.

Технология цифровых двойников (ЦД) в настоящее время является одним из ключевых направлений развития концепции Industry 4.0 и широко применяется в различных отраслях промышленности, включая машиностроение, энергетику, нефтегазовый комплекс, авиационную и транспортную индустрии (таблица 3).

Цифровой двойник представляет собой многомодельную киберфизическую систему, обеспечивающую синхронизацию реального объекта с его виртуальным прототипом на основе потоков эксплуатационных данных, математического моделирования и методов интеллектуальной обработки информации.

В рамках промышленного применения ЦД решаются следующие основные классы задач:

1. непрерывный мониторинг технического состояния оборудования на основе данных датчиков и систем промышленного интернета вещей (IIoT);
2. прогнозирование отказов и оценка остаточного ресурса с использованием методов предиктивной аналитики и моделей деградации;
3. оптимизация режимов эксплуатации оборудования с учетом многокритериальных критериев эффективности, надежности и энергопотребления;
4. снижение удельного и суммарного энергопотребления за счет адаптивного управления технологическими режимами;
5. повышение производительности производственных систем посредством балансировки нагрузок и оптимизации технологических потоков;
6. информационная поддержка принятия управленческих решений на основе цифровых моделей и сценарного анализа.

Несмотря на накопленный значительный опыт внедрения цифровых двойников для энергетического и технологического оборудования, следует отметить, что вопросы разработки полнофункциональных цифровых двойников кабельных машин (КМ) общего типа остаются недостаточно изученными. Существующие решения, как правило, ориентированы на моделирование отдельных функциональных узлов (например, приводных систем, механизмов натяжения или систем намотки) либо отдельных технологических операций, что ограничивает возможность комплексного анализа динамики работы машины как единой многокомпонентной технической системы с взаимосвязанными подсистемами.

Применение цифровых двойников в промышленности

Таблица 3

Отрасль	Объект цифрового двойника	Основная цель
Энергетика	Турбины, котлы, энергоблоки	Повышение надежности и эффективности
Машиностроение	Станки, роботизированные комплексы	Оптимизация производственных процессов
Нефтегазовая отрасль	Насосные станции, трубопроводы	Прогнозирование отказов
Транспорт	Локомотивы, авиационные двигатели	Мониторинг технического состояния

Кабельное производство	Кабельные машины, линии скрутки и намотки	Контроль режимов работы и повышение производительности
------------------------	---	--

Вывод. В связи с этим актуальной научно-технической задачей является разработка цифрового двойника кабельной машины (ЦД КМ) общего типа, базирующегося на комплексной математической модели, учитывающей конструктивно-функциональные особенности оборудования, нелинейный характер протекающих в нем процессов, а также динамическое взаимодействие основных функциональных узлов в различных режимах эксплуатации. Особое значение при этом приобретает учет многосвязности и взаимного влияния механических, электромеханических и технологических подсистем, а также параметрических и структурных изменений, возникающих в процессе длительной эксплуатации.

Реализация такого подхода позволит перейти от традиционных методов периодического контроля и реактивного обслуживания к концепции предиктивного и проактивного управления техническим состоянием оборудования. Это, в свою очередь, обеспечит повышение точности и оперативности мониторинга, развитие методов диагностики на основе анализа больших массивов эксплуатационных данных, а также формирование достоверных прогнозов остаточного ресурса и вероятности отказов.

Кроме того, внедрение ЦД КМ создаст научно-методическую основу для оптимизации режимов работы оборудования в реальном времени, повышения энергетической и технологической эффективности производственных процессов, а также снижения внеплановых простоев и эксплуатационных затрат. В перспективе это обеспечит интеграцию цифровых двойников в структуру интеллектуальных систем управления (ИСУ) производственными процессами, реализующих принципы адаптивного, самонастраивающегося и самообучающегося управления на основе цифровых моделей и методов искусственного интеллекта.

Таким образом, разработка цифрового двойника кабельной машины общего типа является важным этапом цифровой трансформации кабельного производства и способствует повышению его конкурентоспособности за счет внедрения современных киберфизических технологий и интеллектуальных систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. – 2014.
2. Tao F., Zhang M., Liu Y., Nee A. Y. C. Digital Twin Driven Smart Manufacturing. – Academic Press, 2019.
3. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 167685–167708.

4. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems // *Procedia Manufacturing*. – 2017. – Vol. 11. – P. 939–948.
5. Lu Y., Liu C., Wang K. I.-K., Huang H., Xu X. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model and applications // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2020. – Vol. 61. – Art. 101837.
6. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – Vol. 51(11). – P. 1016–1022.
7. Ahelerooff S., Xu X., Zhong R. Y., Lu Y. Digital Twin as a Service (DTaaS) in Industry 4.0 // *Advanced Engineering Informatics*. – 2021. – Vol. 47. – Art. 101225.
8. Boschert S., Rosen R. Digital Twin – The Simulation Aspect // In: *Mechatronic Futures*. – Springer, 2016. – P. 59–74.
9. Uhlemann T. H.-J., Lehmann C., Steinhilper R. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0 // *Procedia CIRP*. – 2017. – Vol. 61. – P. 335–340.
10. ISO 23247-1: Automation systems and integration — Digital Twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles. – International Organization for Standardization, 2021.
11. Wang J., Wang L., Shi J. Digital Twin-driven product design, manufacturing and service with big data // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2021. – Vol. 114. – P. 3411–3433.
12. Jovanovic V., Kuzlu M., Cali U. et al. Digital twin in Industry 4.0 and beyond applications // In: *Digital Twin Driven Intelligent Systems and Emerging Metaverse*. – Springer Nature, 2023. – P. 155–174.