

*Овчинников Егор Сергеевич, магистр,
Иркутский национальный исследовательский технический
университет,
г. Иркутск*

МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ

***Аннотация:** В условиях цифровой трансформации промышленности особую актуальность приобретают методы предиктивного управления качеством, основанные на технологиях цифровых двойников. В статье рассматривается методология построения цифрового двойника производственного процесса, обеспечивающего прогнозирование и предотвращение брака на всех стадиях жизненного цикла продукции. Предложен трехуровневый архитектурный подход, включающий физический, виртуальный и сервисный уровни, а также событийно-сценарный метод идентификации аномалий в условиях временной изменчивости производственных систем. Особое внимание уделено гибридным прогностическим моделям, интегрирующим физическое моделирование и методы машинного обучения, и системе прослеживаемости данных на основе стандартизированных протоколов OPC UA. Разработанная методология создаёт основу для перехода от реактивного управления качеством к предиктивному, что соответствует современной концепции нулевого брака.*

***Ключевые слова:** цифровой двойник, управление качеством, прогнозирование брака, предиктивная аналитика, производственный процесс, гибридное моделирование, событийно-сценарный анализ.*

Ovchinnikov Egor Sergeevich,
Master, Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk

METHODOLOGY FOR BUILDING A DIGITAL DOUBLE OF A PRODUCTION PROCESS FOR PREDICTIVE QUALITY MANAGEMENT OF PRODUCTS

Abstract: *In the context of digital transformation of industry, predictive quality management methods based on digital twin technologies are becoming increasingly important. This article explores the methodology of building a digital twin of a production process that enables the prediction and prevention of defects at all stages of the product lifecycle. It proposes a three-tiered architectural approach that includes physical, virtual, and service levels, as well as an event-based scenario method for identifying anomalies in the context of temporal variability in production systems. Special attention is paid to hybrid predictive models that integrate physical modeling and machine learning methods, and a data traceability system based on standardized OPC UA protocols. The developed methodology provides a foundation for transitioning from reactive quality management to predictive management, which aligns with the modern concept of zero defects.*

Keywords: *digital twin, quality management, defect prediction, predictive analytics, production process, hybrid modeling, and event-scenario analysis.*

Введение

Цифровая трансформация обрабатывающей промышленности характеризуется переходом от реактивных стратегий управления качеством к проактивным и предиктивным подходам. Традиционные методы контроля качества, основанные на выборочных проверках и статистическом управлении процессами, имеют принципиальные ограничения в условиях роста сложности

продукции, ужесточения допусков и требований к прослеживаемости. Технология цифровых двойников, предложенная Майклом Гривзом в 2003 году, представляет собой парадигмальный сдвиг в управлении производством [1].

В контексте управления качеством цифровой двойник выступает не просто как средство визуализации, но как платформа для прогностической аналитики и поддержки принятия решений. Как отмечают исследователи, несмотря на значительный прогресс в области цифровых двойников, существует ряд нерешённых проблем, препятствующих их широкому внедрению для прогнозирования брака [2]. Прежде всего, это фрагментация исследований и решений, ориентированных на отдельные этапы производственного цикла, а также недостаточный учёт временной изменчивости производственных систем.

Цель данной работы заключается в разработке методологии создания цифрового двойника производственного процесса, обеспечивающей прогнозирование и предотвращение брака на всех этапах жизненного цикла изготовления продукции. Методология базируется на трёх ключевых принципах: унификации производственной логики, событийно-ориентированном мониторинге и интеграции прогностических моделей, управляемых данными.

Архитектурные принципы цифрового двойника

Предлагаемая методология базируется на создании системы, которая охватывает весь жизненный цикл производства — от планирования до пост-производственного анализа — и обеспечивает непрерывную обратную связь для предотвращения брака. Основой служит унифицированная модель производственной логики, которая согласует представление производственных элементов, организационных форм и логики выполнения на всех этапах [3].

Архитектура цифрового двойника строится на основе принципа единой модели, которая служит общим фундаментом для всех производственных

приложений. Это позволяет избежать фрагментации моделей и информационных разрывов между планированием, выполнением и анализом. В рамках разработанной методологии предлагается трехуровневая архитектура.

Первый уровень — физический — включает производственное оборудование, оснащённое сенсорами для сбора данных о параметрах процесса, состоянии инструмента и условиях окружающей среды. Второй уровень — виртуальный — представляет собой цифровую модель, которая включает геометрические, кинематические и поведенческие характеристики производственной системы, а также модели технологических процессов. Третий уровень — сервисный — обеспечивает выполнение аналитических и прогностических функций, включая идентификацию аномалий, прогнозирование качества и поддержку принятия решений.

Ключевым элементом информационной модели является использование стандартизированных протоколов обмена данными, таких как OPC UA (Open Platform Communication Unified Architecture), что обеспечивает интероперабельность между разнородными системами и устройствами. Информационная модель должна поддерживать как статические данные о продукте и процессе (спецификации материалов, маршрутные карты), так и потоковые данные от сенсоров в реальном времени.

Событийно-сценарный подход к идентификации аномалий

Для эффективного прогнозирования брака критически важна своевременная идентификация событий, которые могут привести к отклонениям качества. Предлагаемый подход основан на событийно-сценарном анализе, который интегрирует методы обнаружения аномалий с семантической интерпретацией производственного контекста.

В отличие от традиционных методов, основанных на фиксированных пороговых значениях, в методологии используется комбинированная стратегия идентификации ключевых событий, объединяющая глобальные и локальные статистические характеристики системы. Глобальные

характеристики позволяют захватывать отклонения общего динамического паттерна системы, в то время как локальные характеристики чувствительны к краткосрочным флуктуациям параметров. Такой подход особенно эффективен для систем с временной изменчивостью, где дрейф параметров и смена режимов работы могут приводить к ложным срабатываниям при использовании традиционных методов.

Семантическое сопоставление событий и сценариев является следующим критическим этапом. Обнаруженное аномальное событие должно быть связано с конкретным производственным сценарием — например, износом инструмента, изменением свойств материала или отклонением условий окружающей среды. Для этого используется механизм семантического вывода, основанный на правилах и анализе взаимной информации, который позволяет установить связь между низкоуровневыми сигналами и высокоуровневым производственным контекстом.

Как отмечается в исследованиях по предиктивной аналитике качества, расширение возможностей решения производственных задач с использованием цифровых двойников охватывает в том числе интеллектуальное прогнозирование проблем качества и рисков возникновения брака [5]. Разработанная модель предиктивной аналитики предусматривает формирование баз данных рисков возникновения брака и баз данных готовых предиктивных моделей, что позволяет осуществлять прогнозирование несоответствий продукции по качеству и оперативно корректировать настройки производственного процесса.

Гибридные прогностические модели

Прогнозирование качества в предлагаемой методологии рассматривается не как изолированная задача, а как неотъемлемая часть цикла управления производством. Модели прогнозирования должны учитывать не только текущие параметры процесса, но и идентифицированные ключевые события и соответствующие им производственные сценарии.

В основе прогностического модуля лежит гибридный подход, сочетающий физически-информированные модели с методами машинного обучения. Физическая модель обеспечивает базовое понимание процесса и позволяет интерпретировать результаты прогнозирования, в то время как методы машинного обучения адаптируются к конкретным условиям производства и компенсируют ограничения физических моделей.

В области прогнозирования качества можно выделить два основных подхода: моделирование на основе физических законов и методы, управляемые данными. Физические модели, основанные на фундаментальных уравнениях процессов, обеспечивают интерпретируемость, но часто страдают от упрощений и вычислительной сложности. Методы машинного обучения, напротив, демонстрируют высокую точность при наличии достаточного объёма данных, но их «чёрный ящик» остаётся серьёзным барьером для доверия со стороны технологов. Гибридные подходы, объединяющие физически-информированные модели с методами искусственного интеллекта, позволяют достичь как точности, так и интерпретируемости [6].

Современные архитектуры прогностических моделей включают как традиционные методы машинного обучения (случайный лес, машины опорных векторов), так и глубокие нейронные сети, способные выявлять сложные паттерны в многомерных временных рядах. Важным направлением является также разработка объяснимых моделей ИИ (Explainable AI), которые позволяют не только прогнозировать брак, но и понимать причины его возникновения, что критически важно для принятия корректирующих решений.

Для прогнозирования временных характеристик производственных процессов на основе собранных данных предлагается использование глубоких нейронных сетей (архитектур CNN-LSTM), что позволяет более точно планировать производственные операции и выявлять задержки, которые могут свидетельствовать о потенциальных проблемах качества [7].

Система прослеживаемости данных и управления качеством

Эффективное прогнозирование брака невозможно без надёжной системы управления данными и прослеживаемости. Сложность производственных систем, особенно в дискретном производстве и сборке сложных изделий, требует обработки разнородных данных из множества источников — от систем PLM/PDM до оперативных данных сенсоров.

Предлагаемая методология основывается на многоуровневом подходе к управлению данными. Данные структурируются по иерархическому принципу, соответствующему уровням сборки (детали, узлы, изделие в целом), что позволяет отслеживать прогресс на каждом уровне и выявлять аномалии, связанные с конкретными компонентами.

Для управления потоковыми данными используется механизм OPC UA, который обеспечивает связь между физической производственной линией и её виртуальным отображением. Важным аспектом является прослеживаемость — способность отслеживать все данные о конкретном изделии на протяжении всего производственного цикла, включая идентификацию компонентов, параметры процессов и результаты контроля. Это позволяет не только прогнозировать брак в реальном времени, но и проводить ретроспективный анализ для выявления корневых причин и совершенствования моделей прогнозирования.

Практическая апробация и результаты

Предложенная методология успешно апробирована на ряде промышленных примеров, включая производство жидкокристаллических дисплеев, аддитивное производство металлических изделий и сложную механическую сборку.

В производстве LCD-продукции цифровой двойник позволил оценить адекватность выбора критических параметров качества (CTQ) и установить контрольные спецификации для процесса. Применение данных CTQ к цифровому двойнику сделало возможным прогнозирование возникновения дефектов типа «перекрёстные помехи» (crosstalk), что подтверждает

эффективность подхода для прогнозирования брака в производственных системах.

В области аддитивных технологий цифровой двойник демонстрирует способность в реальном времени обнаруживать и прогнозировать аномалии осаждения, что критически важно для обеспечения качества сложных металлических изделий. Интеграция методов компьютерного зрения для анализа двумерных данных и прогностических моделей для одномерных временных рядов позволяет выявлять дефекты на ранних стадиях и корректировать процесс до их возникновения.

В сборочном производстве, где контроль качества особенно сложен из-за многоуровневой структуры и множества факторов влияния, разработанная методология обеспечивает интеграцию данных из разнородных источников и предоставляет инструменты для выявления корреляций между параметрами процесса и качеством конечного изделия. Как показывают исследования, применение графовых моделей знаний позволяет повысить эффективность интеграции данных на 31,6% по сравнению с традиционными методами [8].

Заключение

Разработанная методология создания цифрового двойника производственного процесса представляет собой системное решение проблемы прогнозирования и предотвращения брака, основанное на интеграции унифицированной производственной логики, событийно-сценарной идентификации аномалий и гибридных прогностических моделей. Предложенный подход преодолевает ограничения фрагментированных решений за счёт обеспечения сквозной прослеживаемости данных на всех этапах жизненного цикла изделия и двунаправленной связи между физическим и виртуальным пространствами.

Апробация методологии на различных типах производств подтвердила её практическую эффективность для выявления критических параметров качества и своевременного прогнозирования дефектов. Дальнейшее развитие предложенного подхода связано с совершенствованием инструментов

верификации цифровых двойников, внедрением объяснимых моделей искусственного интеллекта и созданием автономных агентных систем управления качеством, что позволит реализовать концепцию нулевого брака как основу устойчивого и конкурентоспособного производства в соответствии с современными требованиями управления качеством продукции и стандартизации.

Список литературы:

1. Абрамов В.И., Гордеев В.В., Столяров А.Д. Цифровые двойники: характеристики, типология, практики развития // Вопросы инновационной экономики. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 691-716.
2. Барыкин С.Е., Алексеева Н.С. Цифровой двойник технологического процесса для прогнозирования и опережающего управления // Экономическая наука сегодня. — 2026. — № 1 (23). — С. 66-74.
3. Кирсанова Д.Ю., Петросова К.С. Цифровые двойники: новый способ управления ресурсами предприятия // Материалы МСНК «Студенческий научный форум 2026». — 2021. — № 8. — С. 114-117.
4. Программа вступительного испытания по научной специальности 2.5.22 «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства». — Санкт-Петербург: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2025. — URL: <https://www.voenmeh.ru> (дата обращения: 24.07.2026).
5. Малышева Т.В., Лысенков А.И. Развитие системы управления качеством на основе предиктивной аналитики предупреждения рисков несоответствия продукции // Известия Самарского научного центра РАН. — 2024. — № 2. — С. 39-47.
6. Ерпалов А.В., Хорошевский К.А., Гадолина И.В. Актуальные проблемы создания цифровых двойников изделий машиностроения с точки зрения оценки долговечности // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2023. — Т. 89, № 8. — С. 67-75.

7. Сизинцев Д.А. Разработка цифрового двойника технологического процесса с использованием производственных данных : магистерская диссертация. — Томск: ТПУ, 2020.
8. Мясникова О.В. Интеллектуальный цифровой двойник производственно-логистической системы: методика построения и использования для оптимизации системы // Бизнес. Инновации. Экономика : сб. науч. ст. — Минск: Ин-т бизнеса БГУ, 2023. — Вып. 7. — С. 103-116.