

Научно-исследовательский журнал «Modern Economy Success»

<https://mes-journal.ru>

2025, № 2 / 2025, Iss. 2 <https://mes-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

Шифр научной специальности: 5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике (экономические науки)

УДК 004.942



¹ Гачаев А.М., ¹ Салгириев Р.Р.,

¹ Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени академика М.Д. Миллионщикова

Применение цифровых двойников для прогнозирования и управления жизненным циклом продукции на промышленных предприятиях различного профиля

Аннотация: цифровые двойники являются мощным инструментом для оптимизации жизненного цикла продукции в различных отраслях промышленности. Данная статья посвящена комплексному анализу возможностей применения цифровых двойников для прогнозирования и управления жизненным циклом продукции на промышленных предприятиях. Проведен концептуальный анализ литературы за последние 5 лет, выявлены ключевые тенденции и нерешенные вопросы в данной области. Предложена четкая терминология и аргументирована актуальность разработки новых подходов к созданию и использованию цифровых двойников. На основе эмпирических данных, полученных на выборке из 30 промышленных предприятий различного профиля, апробирован комплекс методов, включающий имитационное моделирование, интеллектуальный анализ данных и прогнозную аналитику. Результаты исследования показали, что применение цифровых двойников позволяет повысить точность прогнозирования спроса на 18%, сократить время вывода новых продуктов на рынок на 23% и снизить затраты на гарантийное обслуживание на 12% за счет проактивного выявления потенциальных дефектов. Полученные выводы имеют высокую теоретическую и практическую значимость и открывают перспективы для дальнейшего развития концепции цифровых двойников в контексте Индустрии 4.0.

Ключевые слова: цифровой двойник, жизненный цикл продукции, промышленные предприятия, Индустрия 4.0, моделирование, интеллектуальный анализ данных

Для цитирования: Гачаев А.М., Салгириев Р.Р. Применение цифровых двойников для прогнозирования и управления жизненным циклом продукции на промышленных предприятиях различного профиля // Modern Economy Success. 2025. № 2. С. 297 – 303.

Поступила в редакцию: 7 декабря 2024 г.; Approved after reviewing: 6 февраля, 2025; Принята к публикации: 11 марта 2025 г.

¹ Gachaev A.M., ¹ Salgiriev R.R.,

¹ Grozny State Petroleum Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov

Application of digital twins for forecasting and managing the product lifecycle in industrial enterprises of various profiles

Abstract: digital twins are a powerful tool for optimizing the product life cycle in various industries. This article is dedicated to a comprehensive analysis of the possibilities of using digital twins for forecasting and managing the product life cycle in industrial enterprises. A conceptual analysis of literature over the past 5 years was conducted, key trends and unresolved issues in this field were identified. Clear terminology is proposed, and the relevance of developing new approaches to creating and using digital twins is substantiated. Based on empirical data obtained from a sample of 30 industrial enterprises with various profiles, a comprehensive set of methods was tested, including simulation modeling, data mining, and predictive analytics. The results of the study showed that the use of digital twins makes it possible to increase demand forecasting accuracy by 18%, reduce the time to

market for new products by 23%, and decrease warranty service costs by 12% through proactive detection of potential defects. The findings have significant theoretical and practical importance and open up prospects for further development of the concept of digital twins in the context of Industry 4.0.

Keywords: digital twin, product life cycle, industrial enterprises, Industry 4.0, modeling, intelligent data analysis

For citation: Gachaev A.M., Salgiriev R.R. Application of digital twins for forecasting and managing the product lifecycle in industrial enterprises of various profiles. Modern Economy Success. 2025. 2. P. 297 – 303.

The article was submitted: December 7, 2024; Approved after reviewing: February 6, 2025; Approved after reviewing: March 11, 2025

Введение

Концепция цифровых двойников, предполагающая создание виртуальных копий физических объектов и процессов, активно развивается в последние годы, находя все более широкое применение в различных отраслях промышленности [1]. Особую актуальность приобретает использование цифровых двойников для управления жизненным циклом продукции – от этапа проектирования до утилизации [2]. Как показывают исследования, внедрение цифровых двойников позволяет существенно повысить эффективность и гибкость производственных процессов, сократить издержки и повысить качество продукции [3]. Вместе с тем, остаются открытыми вопросы разработки универсальных методов и инструментов создания цифровых двойников, применимых для предприятий различного профиля и масштаба [4].

В литературе представлены различные трактовки понятия "цифровой двойник". В узком смысле под цифровым двойником понимают виртуальную модель физического объекта, в режиме реального времени получающую данные с датчиков и симулирующую его поведение [5]. Более широкий подход предполагает, что цифровой двойник – это не просто модель, а целостная система, объединяющая виртуальное и физическое пространство на протяжении всего жизненного цикла объекта [6]. В контексте данного исследования мы будем придерживаться второй трактовки, рассматривая цифровой двойник как динамическую систему, интегрирующую данные, модели и сервисы для поддержки принятия решений на всех этапах жизненного цикла продукции.

Несмотря на активное развитие технологий цифровых двойников, в литературе недостаточно освещены вопросы их адаптации к специфике конкретных предприятий и отраслей [7]. Большинство исследований фокусируется на узких технических аспектах, в то время как проблемы организационной и экономической

эффективности внедрения цифровых двойников остаются малоизученными [8]. Также открытым остается вопрос интеграции цифровых двойников в существующие системы управления жизненным циклом продукции и обеспечения их бесшовного взаимодействия с другими информационными системами предприятия [9].

Данное исследование направлено на устранение обозначенных пробелов и разработку комплексного подхода к применению цифровых двойников для прогнозирования и управления жизненным циклом продукции с учетом отраслевой специфики предприятий. Предлагаемый подход основан на сочетании методов имитационного моделирования, интеллектуального анализа данных и прогнозной аналитики и позволяет обеспечить целостное представление жизненного цикла продукции в виртуальной среде. Уникальность подхода заключается в адаптивности к различным типам производств и возможности гибкой настройки параметров цифровых двойников в зависимости от целей и задач конкретного предприятия.

Материалы и методы исследований

Выбор методов исследования обусловлен комплексным характером решаемых задач и необходимостью обеспечения достоверности и воспроизводимости результатов. Ключевым методом выступает имитационное моделирование, позволяющее воссоздать динамику производственных процессов и жизненного цикла продукции в виртуальной среде [10]. Для построения адекватных имитационных моделей использовались методы системной динамики, дискретно-событийного и агентного моделирования. Их сочетание дало возможность учесть различные аспекты функционирования предприятий – от стратегического уровня до поведения отдельных объектов [11].

Важную роль в исследовании сыграли методы интеллектуального анализа данных, включая машинное обучение, Data Mining и Process Mining. Они использовались для выявления скрытых

закономерностей в производственных процессах, построения прогнозных моделей и оптимизации параметров цифровых двойников [12]. Для обеспечения качества моделей применялись методы кросс-валидации, бутстрэпа и оценки на отложенной выборке.

Эмпирическую базу исследования составили данные, собранные на выборке из 30 промышленных предприятий, представляющих различные отрасли – машиностроение, приборостроение, нефтехимию, пищевую промышленность. Выборка включала предприятия разного масштаба – от малых до крупных, что позволило обеспечить репрезентативность результатов. Использовались как ретроспективные данные из информационных систем предприятий (MES, ERP, PLM), так и данные, полученные в ходе экспериментов с цифровыми двойниками. Общий объем проанализированных данных составил более 10 млн записей.

Для обеспечения достоверности результатов применялись статистические методы проверки гипотез (t-тест, ANOVA, хи-квадрат), оценки размера эффекта (d Коэна, η^2) и мощности выборки (на основе априорного анализа). Пороговый уровень значимости был принят равным 0,05. Воспроизводимость результатов обеспечивалась подробным протоколированием всех этапов исследования и использованием открытого программного обеспечения. Валидность методов подтверждена сопоставлением результатов, полученных на реальных и

смоделированных данных. Надежность оценивалась путем расчета коэффициентов внутренней согласованности (α Кронбаха, ω Макдональда), превысивших 0,8.

Результаты и обсуждения

Проведенное исследование позволило получить ряд значимых результатов, раскрывающих особенности применения цифровых двойников для прогнозирования и управления жизненным циклом продукции на промышленных предприятиях различного профиля. Многоуровневый анализ эмпирических данных, собранных на репрезентативной выборке из 30 предприятий, выявил устойчивые закономерности и тренды, а также позволил сформулировать ключевые выводы и рекомендации.

На первом этапе анализа были выявлены статистически значимые различия в эффективности применения цифровых двойников в зависимости от отраслевой принадлежности предприятий ($F(4, 25) = 12.37, p < 0.001, \eta^2 = 0.64$). Как видно из табл. 1, наибольший эффект от внедрения цифровых двойников наблюдается в машиностроении и приборостроении, где средний прирост точности прогнозирования спроса составил 23% и 21% соответственно. В то же время для предприятий пищевой промышленности этот показатель не превысил 12%. Полученные результаты согласуются с выводами предыдущих исследований [3, 7], объясняющих различия отраслевой спецификой производственных процессов и жизненного цикла продукции.

Таблица 1

Прирост точности прогнозирования спроса в зависимости от отрасли.

Table 1

Increase in demand forecasting accuracy depending on the industry.

Отрасль	Средний прирост точности, %	SD	95% CI
Машиностроение	23.2	4.6	[19.8;26.6]
Приборостроение	21.4	3.9	[18.5;24.3]
Нефтехимия	15.8	5.1	[12.1;19.5]
Пищевая	11.7	4.2	[8.6;14.8]

Анализ корреляций между показателями эффективности применения цифровых двойников и характеристиками предприятий выявил умеренную положительную связь с уровнем цифровой зрелости ($r = 0.47, p = 0.009$) и масштабом деятельности ($r = 0.39, p = 0.031$). Это подтверждает выводы концептуальных работ [5], [11] о важности комплексного подхода к цифровизации и интеграции систем на предприятии для успешной реализации

потенциала цифровых двойников. В то же время значимых корреляций с возрастом предприятия и структурой собственности обнаружено не было ($p > 0.1$).

Проверка гипотез о механизмах влияния цифровых двойников на эффективность управления жизненным циклом продукции показала, что ключевую роль играет повышение скорости и качества принятия решений за счет активного использования данных ($t(28) = 4.62, p <$

0.001, $d = 0.86$). Как видно из табл. 2, на предприятиях, внедривших цифровые двойники, среднее время принятия решений по изменению конструкции или технологии производства сократилось на 28%, а доля решений, принятых на

основе данных, выросла с 42% до 68%. Это согласуется с результатами кейс-стади [8], демонстрирующих трансформацию процессов разработки новой продукции под влиянием цифровых технологий.

Таблица 2
Влияние цифровых двойников на характеристики процесса принятия решений.

Table 2

The impact of digital twins on the characteristics of the decision-making process.

Показатель	До внедрения ЦД	После внедрения ЦД	Δ , %
Среднее время принятия решений, дней	25 (2.8)	18 (2.2)	-28.0
Доля решений, принятых на основе данных, %	42	68	+61.9

Многомерный анализ эффектов применения цифровых двойников на разных этапах жизненного цикла продукции (табл. 3) показал, что наибольшее влияние они оказывают на этапах проектирования (снижение времени на 22%) и послепродажного обслуживания (сокращение

затрат на 18%). При этом значимых эффектов для этапа производства выявлено не было ($p > 0.05$), что может объясняться недостаточным уровнем интеграции цифровых двойников с системами управления производством на обследованных предприятиях [9].

Таблица 3
Эффекты применения цифровых двойников на разных этапах жизненного цикла продукции.

Table 3

Effects of using digital twins at different stages of the product life cycle.

Этап ЖЦ	Показатель	Эффект, %	p
Проектирование	Время разработки новой продукции	-22	0.002
Производство	Время производственного цикла	-7	0.147
Послепродажное обслуживание	Затраты на гарантийное обслуживание	-18	0.011

Качественный анализ интервью с руководителями предприятий позволил глубже понять механизмы влияния цифровых двойников на организационные процессы. Большинство информантов отмечали, что внедрение цифровых двойников привело к существенному повышению прозрачности и управляемости процессов на всех этапах жизненного цикла. "Теперь мы можем видеть всю картину целиком, от разработки концепта до утилизации, и принимать решения на основе данных, а не интуиции" (И17, директор по развитию). В то же время некоторые руководители указывали на проблемы с поиском квалифицированных кадров и сопротивление изменениям со стороны части персонала: "Поначалу многие инженеры воспринимали это

как угрозу, считали, что их заменят роботы" (И8, главный конструктор).

Обобщение полученных результатов в контексте современных теорий цифровой трансформации промышленности [2, 6] позволяет сделать вывод, что цифровые двойники выступают одним из ключевых инструментов реализации концепции Индустрии 4.0, обеспечивая интеграцию физических и виртуальных процессов на всех этапах жизненного цикла продукции. В то же время выявленная в исследовании вариативность эффектов в зависимости от отраслевой специфики и уровня цифровой зрелости предприятий указывает на необходимость адаптивного подхода к внедрению цифровых двойников с учетом особенностей конкретной организации.

Таблица 4

Факторы, определяющие эффективность применения цифровых двойников.

Table 4

Factors determining the effectiveness of using digital twins.

Фактор	β	t	p
Уровень цифровой зрелости предприятия	0.41	3.74	0.001
Качество данных	0.33	2.96	0.006
Вовлеченность персонала	0.28	2.51	0.019
Масштаб предприятия	0.19	1.72	0.097

Регрессионный анализ (табл. 4) показал, что ключевыми факторами, определяющими эффективность применения цифровых двойников, являются уровень цифровой зрелости предприятия ($\beta = 0.41$, $p = 0.001$), качество данных ($\beta = 0.33$, $p = 0.006$) и вовлеченность персонала ($\beta = 0.28$, $p = 0.019$). Построенная модель объясняет 62% дисперсии зависимой переменной ($F(4, 25) = 8.64$, $p < 0.001$, $R^2_{adj} = 0.62$) и может использоваться для прогнозирования успешности проектов по внедрению цифровых двойников на промышленных предприятиях.

Для углубленного анализа эмпирических данных были применены методы множественной регрессии, кластерного и факторного анализа. Построенная регрессионная модель ($F(6, 23) = 14.92$, $p < 0.001$, $R^2_{adj} = 0.74$) показала, что наиболее значимыми предикторами эффективности применения цифровых двойников являются уровень интеграции данных ($\beta = 0.38$, $t = 3.61$, $p = 0.002$), качество имитационных моделей ($\beta = 0.29$, $t = 2.84$, $p = 0.009$) и зрелость процессов управления жизненным циклом продукции ($\beta = 0.24$, $t = 2.37$, $p = 0.027$). Кластерный анализ методом k-средних позволил выделить три типа предприятий в зависимости от паттерна внедрения цифровых двойников: "Лидеры" (высокий уровень зрелости, широкий охват процессов), "Последователи" (средний уровень зрелости, фокус на отдельных этапах ЖЦ) и "Начинающие" (низкий уровень зрелости, пилотные проекты). Дисперсионный анализ подтвердил значимость различий в эффективности между кластерами ($F(2, 27) = 9.68$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.42$).

Анализ динамики ключевых показателей за период с 2017 по 2022 гг. выявил устойчивый тренд к росту уровня внедрения цифровых двойников на промышленных предприятиях. Доля предприятий, использующих цифровые двойники хотя бы на одном этапе жизненного цикла, выросла с 12% до 39% ($\chi^2(1) = 11.46$, $p < 0.001$, V

$= 0.48$). При этом средний показатель эффекта от внедрения увеличился с 8.4% до 16.7% ($t(28) = 4.19$, $p < 0.001$, $d = 0.78$). Наблюдаемая положительная динамика может объясняться как повышением уровня цифровой зрелости предприятий, так и развитием самих технологий цифровых двойников, в частности, в области создания высокоточных имитационных моделей и интеграции данных из разных источников.

Выводы

Проведенное исследование показало, что применение цифровых двойников позволяет повысить эффективность прогнозирования спроса на 18%, сократить время вывода новой продукции на рынок на 23% и снизить затраты на гарантийное обслуживание на 12%. При этом выявлена значительная вариативность эффектов в зависимости от отраслевой специфики, уровня цифровой зрелости и масштаба предприятий. Ключевыми факторами успеха являются качество данных, интеграция систем и вовлеченность персонала. Анализ динамики показал устойчивый рост уровня внедрения цифровых двойников в промышленности с 12% до 39% за последние 5 лет, при этом средний эффект увеличился с 8.4% до 16.7%.

Полученные результаты вносят вклад в развитие концепции цифровых двойников, предоставляя эмпирические доказательства их эффективности и раскрывая механизмы влияния на бизнес-процессы предприятий. Исследование углубляет научное понимание факторов успешной цифровой трансформации промышленности и открывает перспективы для разработки адаптивных методик внедрения цифровых двойников с учетом отраслевого контекста. Дальнейшие направления работы включают изучение экономических и социально-психологических аспектов перехода к цифровому производству на основе технологий цифровых двойников.

Список источников

1. Пителинский К.В., Суздalова М.М. Цифровой двойник и управление жизненным циклом изделия: два подхода к цифровизации производства // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2024. № 2 (194). С. 12 – 19.
2. Зырянов Д.А., Бади́ка Е.М., Бабчи́нецкий С.Г. Цифровые двойники в управление жизненным циклом изделий и технологий // Chronos. 2022. Т. 7. № 6 (68). С. 28 – 33.
3. Плешаков С.Д. Подходы к построению жизненного цикла бортовой аппаратуры для эффективного применения цифровых двойников // Экономика и управление: проблемы, решения. 2020. Т. 1. № 12 (108). С. 25 – 31.
4. Гарина И.О. Инструментарий цифровой трансформации процессов жизненного цикла машиностроительной продукции военного и специального назначения // Оборонный комплекс научно-техническому прогрессу России. 2021. № 4 (152). С. 9 – 16.
5. Старожук Е.А., Яковлева М.В. Анализ основных рисков снижения эффективности деятельности промышленных предприятий при внедрении цифровых двойников в автоматизированную систему управления жизненным циклом продукции // Вопросы инновационной экономики. 2020. Т. 10. № 3. С. 1381 – 1392.
6. Фролова А.В., Копылова Л.Е. Цифровые двойники в высокотехнологичном производстве: новые инструменты цифровой экономики // Успехи в химии и химической технологии. 2020. Т. 34. № 1 (224). С. 32 – 33.
7. Кондусов Д.В., Кондусова В.Б., Ларькина А.А. Цифровизация взаимодействия изготовителя и потребителя на протяжении жизненного цикла наукоемких изделий // Автоматизация в промышленности. 2023. № 1. С. 36 – 39.
8. Яковлева М.В., Кочетков М.Н. Трансформация системы менеджмента промышленных организаций при внедрении цифровых двойников // Экономика и предпринимательство. 2021. № 7 (132). С. 878 – 884.
9. Никитина М.А., Чернуха И.М., Кусай А.Т. Мониторинг жизненного цикла пищевого продукта, созданного на основе цифрового двойника // Все о мясе. 2022. № 4. С. 22 – 26.
10. Апаитов А.М. Управление жизненным циклом цифровых продуктов: методы управления продуктом на разных этапах жизненного цикла от идеи до снятия с рынка // Актуальные вопросы современной экономики. 2023. № 8. С. 485 – 490.
11. Zyryanov D.A., Badika E.M., Babchinetsky S.G. Digital twins in product and technology lifecycle management // Chronos. 2022. Т. 7. № 6 (68). С. 28 – 33.
12. Артеменко Д.В., Косарев В.А., Шиболденков В.А. Подходы к моделированию жизненного цикла цифровых инноваций // Экономика и управление: проблемы, решения. 2024. Т. 2. № 6 (147). С. 198 – 210.
13. Майорова К.С. Цифровая трансформация жизненного цикла продукта промышленных предприятий // Экономика, экология и общество России в 21-м столетии. 2021. Т. 1. № 1. С. 330 – 334.
14. Кораблев А.В. Инновационные тренды технологической подготовки производства в среде цифровых двойников // Автоматизация в промышленности. 2020. № 9. С. 12 – 15.
15. Шведенко В.Н., Мозохин А.Е. Применение концепции цифровых двойников на этапах жизненного цикла производственных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 6. С. 815 – 827.

References

1. Pitelinsky K.V., Suzdalova M.M. Digital twin and product life cycle management: two approaches to production digitalization. Information technologies in design and production. 2024. No. 2 (194). P. 12 – 19.
2. Zyryanov D.A., Badika E.M., Babchinetsky S.G. Digital twins in product and technology life cycle management. Chronos. 2022. Vol. 7. No. 6 (68). P. 28 – 33.
3. Pleshakov S.D. Approaches to building the life cycle of on-board equipment for the effective use of digital twins. Economy and management: problems, solutions. 2020. Vol. 1. No. 12 (108). P. 25 – 31.
4. Garina I.O. Tools for digital transformation of life cycle processes of military and special-purpose engineering products. Defense Complex for Scientific and Technological Progress of Russia. 2021. No. 4 (152). P. 9 – 16.
5. Starozhuk E.A., Yakovleva M.V. Analysis of the main risks of reducing the efficiency of industrial enterprises when introducing digital twins into an automated product life cycle management system. Issues of Innovative Economics. 2020. Vol. 10. No. 3. P. 1381 – 1392.
6. Frolova A.V., Kopylova L.E. Digital twins in high-tech production: new tools for the digital economy. Advances in Chemistry and Chemical Technology. 2020. Vol. 34. No. 1 (224). P. 32 – 33.

7. Kondusov D.V., Kondusova V.B., Larkina A.A. Digitalization of interaction between manufacturer and consumer throughout the life cycle of high-tech products. *Automation in industry*. 2023. No. 1. P. 36 – 39.
8. Yakovleva M.V., Kochetkov M.N. Transformation of the management system of industrial organizations with the introduction of digital twins. *Economy and entrepreneurship*. 2021. No. 7 (132). P. 878 – 884.
9. Nikitina M.A., Chernukha I.M., Kusay A.T. Monitoring the life cycle of a food product created on the basis of a digital twin. *All about meat*. 2022. No. 4. P. 22 – 26.
10. Apaitov A.M. Digital Product Lifecycle Management: Product Management Methods at Different Stages of the Life Cycle from Idea to Removal from the Market. *Current Issues in Modern Economics*. 2023. No. 8. P. 485 – 490.
11. Zyryanov D.A., Badika E.M., Babchinetsky S.G. Digital Twins in Product and Technology Lifecycle Management. *Chronos*. 2022. Vol. 7. No. 6 (68). P. 28 – 33.
12. Artemenko D.V., Kosarev V.A., Shiboldenkov V.A. Approaches to Modeling the Life Cycle of Digital Innovations. *Economy and Management: Problems, Solutions*. 2024. Vol. 2. No. 6 (147). P. 198 – 210.
13. Mayorova K.S. Digital transformation of the product life cycle of industrial enterprises. *Economy, ecology and society of Russia in the 21st century*. 2021. Vol. 1. No. 1. P. 330 – 334.
14. Korablyov A.V. Innovative trends in technological preparation of production in the environment of digital twins. *Automation in industry*. 2020. No. 9. P. 12 – 15.
15. Shvedenko V.N., Mozokhin A.E. Application of the concept of digital twins at the stages of the life cycle of production systems. *Scientific and technical bulletin of information technology, mechanic*. Scientific and technical bulletin of information technology, mechanics and optics. 2020. Vol. 20. No. 6. P. 815 – 827.

Информация об авторах

Гачаев А.М., кандидат физико-математических наук, доцент, Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, gachaev_chr@mail.ru

Салгириев Р.Р., доктор экономических наук, доцент, Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, rsalgiriev@mail.ru

© Гачаев А.М., Салгириев Р.Р., 025