

УДК 69.003

DOI 10.22213/2410-9304-2023-3-11-26

Цифровой двойник – эффективный инструмент цифровой трансформации промышленных предприятий

Н. Л. Тарануха, доктор экономических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
С. В. Семёнова, кандидат экономических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
С. Н. Панков, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В статье изложены результаты исследования происходящих процессов цифровой трансформации научно-производственных предприятий с применением технологии цифрового двойника. Рассмотрена степень внедрения цифровых технологий и уровень производительности труда в развитых странах мира и в России. Изучены концепция, определение, свойства и характеристики технологии цифрового двойника. Исследованы применяемые методы цифрового проектирования и моделирования в технологии цифровых двойников.

Проанализированы особенности создания, функциональное назначение, получаемые преимущества технологии цифровых двойников на различных стадиях жизненного цикла объекта – при проектировании, производстве и эксплуатации. Приведены практические примеры применения цифровых двойников в отечественной промышленности: конструирование автомобиля премиум-класса проекта «Кортеж», оптимизации технологических операций шлифования при изготовлении изделий, внедрения системы предиктивной прогностики и мониторинга современного высокотехнологического оборудования парогазового блока ПГУ Ижевской ТЭЦ-1 для контроля эксплуатационного состояния, надежного прогнозирования технологических процессов, защиты от инцидентов и аварий. Исследовано применение технологии цифрового двойника в качестве тренажного комплекса для обучения оперативного персонала объектов промышленной отрасли на основе моделирования редко встречаемых и критически опасных эксплуатационных режимов промышленных объектов.

Исследован российский рынок цифрового проектирования и моделирования с выявлением ключевых лидеров. Обобщены приоритетные цифровые технологии для достижения технологического лидерства отечественных компаний.

В результате исследования выявлены ключевые возможности технологии цифровых двойников и барьеры, сдерживающие процессы полномасштабной цифровой трансформации научно-производственных предприятий. Предложены рекомендации для успешной реализации и развития технологии цифровых двойников. Обобщены мотивирующие факторы государственной поддержки цифровой трансформации отечественного бизнеса.

Ключевые слова: цифровая трансформация, цифровые технологии, цифровой двойник.

Введение

В современном мире происходят масштабные процессы изменений функционирования отдельных компаний и отраслей экономики, основанные на стремительном развитии и внедрении целого ряда цифровых технологий. Эти процессы называются цифровой трансформацией, а в число технологий, которые позволяют осуществить цифровую трансформацию, как правило, включают искусственный интеллект и машинное обучение, интернет вещей и большие данные, технологии распределенного реестра и блокчейн, робототехнику и квантовые технологии, виртуальную и дополненную реальность, предиктивную аналитику, нейротехнологии и фотонику. Ключевую роль в цифровой трансформации занимает технология цифровых двойников, являющаяся интегратором «сквозных» цифровых технологий, позволяю-

щим высокотехнологичным компаниям переходить на новый уровень устойчивого развития на пути к промышленному лидерству [1, 2].

Необходимость и актуальность цифровой трансформации отечественной производственной сферы подтверждают статистические данные, приведенные на рис. 1 [3, 4]: уровень внедрения цифровых технологий Российской Федерации по отношению к ведущим развитым странам мира отстает на 36 %, а производительность труда персонала в виде объема валового продукта страны на один рабочий час меньше на 56 %. Увеличение конкурентоспособности и эффективности отечественной производственной сферы возможно за счет реализации принципов бережного производства, автоматизации рутинных операций, внедрения комплекса прорывных цифровых технологий, включая технологию цифрового двойника [5].



Рис. 1. Уровень развития цифровизации и производительности труда различных стран

Fig. 1. Level of development of digitalization and labor productivity in different countries

Актуальность исследования также подтверждается наличием интереса научного сообщества к цифровым двойникам: так, число научных тематических публикаций по теме цифровых двойников в международной системе научных цитирований Scopus [6] с 2018 по 2021 г. возросло в 8,5 раза.

Целями настоящего исследования являются:

1. Изучение сущности, свойств и характеристик, методов проектирования и моделирования технологии цифровых двойников.

2. Изучение ключевых возможностей технологии цифровых двойников на стадиях разработки, изготовления и эксплуатации объектов с исследованием практических примеров реализации технологии цифровых двойников.

4. Выявление ключевых отечественных компаний-лидеров в сфере цифровых двойников.

5. Исследование коренных барьеров, препятствующих полномасштабной цифровой трансформации отечественной производственной отрасли.

6. Выработка рекомендаций для успешной реализации и развития технологии цифровых двойников.

Исследование технологии цифровых двойников

Любой объект материального физического мира может быть повторен в виртуальной среде с использованием системы математических и компьютерных моделей, созданием информационных взаимосвязей при помощи потока фактических данных реального физического объекта и обратных информационных потоков цифрового объекта в соответствии с рис. 2.

Прообразом цифрового двойника является интеллект человека, когда творческое мышление выступает в качестве виртуальной среды, а двойниками являются умственные образы предметов, процессов и явлений. Врожденная склонность детей подражать взрослым является моделью познания мира посредством «научения по образцу и подобию». Феномен высокого темпа развития промышленности Китая напрямую связан с практикой реинжиниринга высокотехнологичных изделий других стран, когда с целью тщательного изучения исследуемый образец разбирается на составные части, высокоточным мерительным инструментом снимаются чертежи, определяется химический состав материалов деталей.

В основе концепции цифровых двойников заложена идея, что для любого объекта можно создать представление в виде двух систем – физической и виртуальной, включающей в себя всю информацию о физической системе, при этом происходит постоянное «зеркальное отображение», когда виртуальная система за счет информационных связей «отображает» реальную систему и наоборот [7].

Согласно национальному стандарту ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» цифровой двойник изделия является системой, включающей в себя цифровую модель изделия и двухсторонние информационные связи с изделием и (или) его составными частями. Предварительный национальный стандарт ПНСТ 429-2020 «Умное производство. Двойники цифрового производ-

ства. Часть 1. Общие положения» определяет цифровой двойник как программно-аппаратный комплекс, реализующий комплексную динамическую модель для исследования и управления деятельностью социотех-

нической системы. В целом, цифровой двойник – это виртуальная модель процесса, продукта или услуги, которая позволяет проводить анализ данных и мониторинг систем с помощью численного моделирования [8].

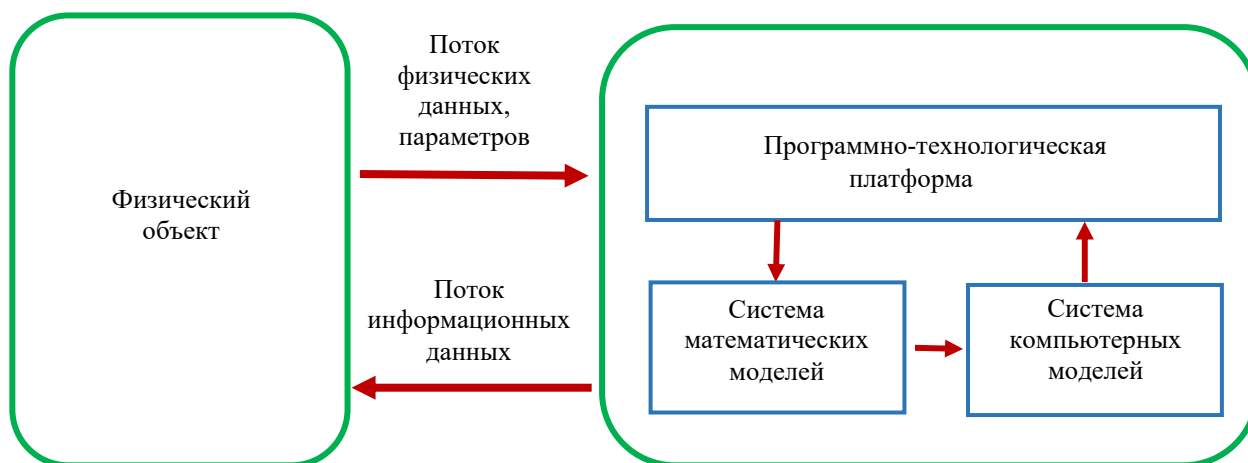


Рис. 2. Схема двусторонних информационных связей цифрового двойника с реальным объектом

Fig. 2. The scheme of two-way information links of a digital double with a real object

В технологии цифрового двойника ключевую роль играют следующие совокупные методы цифрового проектирования и моделирования [9, 10]:

- САД-системы компьютерного проектирования (Computer-Aided Design, CAD) – программные системы компьютерного проектирования, позволяющие на основе 3D-моделей осуществлять создание чертежей и (или) оформление конструкторской и (или) технологической документации;

- программные системы компьютерного инжиниринга (Computer-aided engineering, CAE), позволяющие на основе математических моделей разных классов и уровней сложности, описываемых, как правило, нестационарными нелинейными уравнениями в частных производных, исследовать поведение материалов, физико-механических и технологических процессов, машин и конструкций;

- математическое моделирование, компьютерный и суперкомпьютерный (Computer-Aided Engineering, CAE и High-Performance Computing, HPC) инжиниринг и оптимизация (Computer-Aided Optimization, CAO) как совокупность методов и средств решения научно-технических проблем путем математического, компьютерного и суперкомпьютерного моделирования на основе CAE-систем, и высокопроизводительных вычислительных систем;

- HPC-системы, суперкомпьютеры и кластеры, позволяющие эффективно реализовать под-

ход одновременного решения нескольких вариантов задач или разнообразных задач из нескольких отраслей промышленности;

- технологическая подготовка процесса производства, ориентированная как на формирование управляющих программ станков с числовым программным управлением ЧПУ (Computer-Aided Manufacturing, CAM), так и на моделирование технологических процессов аддитивного производства (Computer-Aided Additive Manufacturing, CAAM);

- САМ-системы, программные системы технологической подготовки производства, позволяющие на основе 3D-моделей, полученных из САД-систем, осуществлять разработку управляющих программ для изготовления изделий на оборудовании с ЧПУ;

- СААМ-системы, специализированные программные системы, обеспечивающие процесс обработки, исправления геометрии и подготовки 3D-моделей, полученных из САД/САЕ-систем для аддитивного производства;

- бионический дизайн (Simulation & Optimization - Driven Bionic Design) – процесс проектирования и производства в кратчайшие сроки глобально конкурентоспособной и кастомизированной продукции нового поколения на основе применения цифровых технологий, компьютерный инжиниринг, оптимизация и передовые производственные технологии, когда инженерные решения напоминают структуры, встречающиеся в живой природе;

– технологии управления данными о продукте (Product Data Management, PDM), решения и методики, используемые внутри компании для организации, обеспечения доступа и управления данными, которые имеют отношение к продуктам, а также для управления жизненным циклом этих продуктов;

– технологии управления жизненным циклом изделий (Product Lifecycle Management, PLM), набор совместимых технических решений для поддержки общего представления информации о продукте в процессе его создания, реализации и эксплуатации, в среде расширенного предприятия, начиная от концепции создания продукта и заканчивая его утилизацией, при интеграции людских ресурсов, процессов и информации.

Цифровой двойник должен обладать следующими свойствами и характеристиками:

1. В состав цифрового двойника входит цифровая модель объекта, которая содержит систему математических и компьютерных моделей, объединенных соответствующими электронными документами.

2. Математические и компьютерные модели прошли процедуру верификации и валидации. Верификация модели подтверждает корректность решения уравнений математической модели с заданной степенью точности. Валидация модели подтверждает адекватность математической и компьютерной модели физическому объекту.

3. Для изделия сформирована многоуровневая система требований, которая была сбалансирована путем проведения цифровых испытаний.

4. Для всех математических и компьютерных моделей проведены цифровые испытания, в том числе на соответствующих цифровых испытательных стендах и полигонах.

5. По результатам разработки моделей и проведения цифровых испытаний сформированы соответствующие сопроводительные электронные документы.

6. Для поддержания актуального состояния цифрового двойника сформированы двухсторонние информационные связи с реальным объектом.

Цифровые двойники могут создаваться на всех стадиях жизненного цикла реального объекта. В ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ. Общие положения» выделены следующие типы цифровых двойников изделия: ЦД-Р, ЦД-П, ЦД-Э, наполнение и функциональность которых определяется в ходе

реализации стадий разработки, производства и эксплуатации объекта соответственно.

Цифровой двойник ЦД-Р наполняется данными и формируется на стадии разработки изделия по итогам проведения большого числа цифровых испытаний и рациональной балансировки матрицы требований и целевых показателей, а также успешного выполнения натуральных испытаний опытных образцов. Затем, когда изделие выходит на стадию производства, цифровой двойник начинает наполняться данными по результатам технологических процессов и производственных операций, формируется цифровой двойник на стадии производства – ЦД-П. Наконец, цифровой двойник ЦД-Э формируется на стадии эксплуатации за счет пополнения данными о текущем состоянии и поведении изделия. Это связано с тем, что в процессе эксплуатации поведение реального изделия сопровождается изменениями его состояния. Изменения состояния изделия сопровождаются изменениями состояния цифрового двойника, и наоборот, результаты моделирования и принимаемые управленческие решения могут влиять на функционирование и состояние изделия на стадии эксплуатации. Это обеспечивает высокую степень соответствия цифрового двойника изделия реальному объекту. Таким образом, цифровой двойник наполняется данными на каждой стадии жизненного цикла изделия, что позволяет повысить уровень адекватности цифрового двойника.

Рассмотрим особенности применения технологии цифровых двойников ЦД-Р на стадии разработки изделия. При создании высокотехнологичных изделий основное преимущество технологии цифровых двойников заключается в снижении времени, материальных и финансовых ресурсов на проектирование, производство, испытания и доводку до нормативных требований опытных образцов, повышения скорости вывода на рынок готовой продукции [11], что отображено на рис. 3.

Разработка изделий и объектов на основе технологии цифровых двойников позволяет проводить цифровые испытания до создания физического опытного образца, что существенно снижает объемы натуральных испытаний, которые в традиционном подходе необходимы для доработки изделия до нормативных характеристик методом значительного количества испытаний опытных образцов [12]. Благодаря проведению испытаний в цифровом пространстве инженер-конструктор может многократно проводить проверки и заранее просчитывать пове-

дение объекта и возникновение возможных отказов, моделируя с минимальными финансовыми затратами различные условия эксплуатации. Цифровые стенды и полигоны позволяют провести неограниченное число испытаний множества конструкций и изделий во всех возможных для моделирования условиях эксплуатации,

в том числе в опасных, критических режимах. В результате уменьшается время разработки изделий, снижается количество опытных образцов, минимизируются финансовые и временные затраты на проведение испытаний и организацию работы физических испытательных стендов и полигонов.

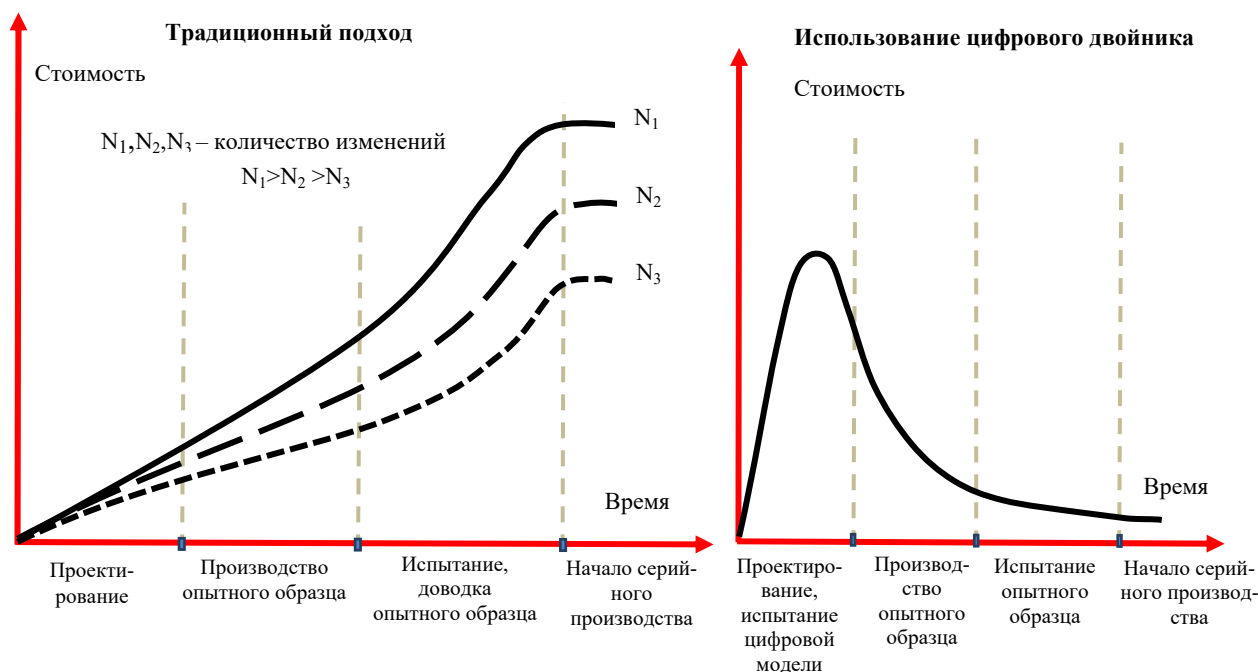


Рис. 3. Зависимость стоимости и времени разработки образца при традиционном подходе и при применении технологии цифрового двойника

Fig. 3. The dependence of the cost and time of sample development with the traditional approach and with the use of digital twin technology

Наиболее ярким примером является проведение комплексной оценки безопасности и качества технических решений автотранспорта с использованием натурального краш-теста. Современный автомобиль обязан удовлетворять комплексным требованиям сертификационных и рейтинговых испытаний, огромному числу целевых показателей, в том числе активной и пассивной безопасности, аэродинамики, технологичности и т. д. Проведение натуральных испытаний является чрезвычайно дорогостоящим мероприятием, поэтому действенным способом сокращения затрат и минимизации времени на принятие автомобиля в серийное производство является проведение цифровых испытаний. В мировой автопромышленности произошло радикальное сокращение соотношения числа натуральных и цифровых испытаний: в 2007 году – 100 к 100, а в 2022 году – уже 5 к 30 000.

Проведение в автоматическом режиме десятков тысяч цифровых испытаний при различных вариантах возможных столкновений позволяет

моделировать разрушение порядка 5–8 тысяч сварных точек кузова автомобиля и оценивать уровень возможных повреждений с целью достижения нормативного уровня пассивной безопасности [13, 14].

Рассмотрим пример применения цифрового двойника ЦД-П на стадии производства изделия. Обеспечение высокого качества изделий и эффективного производства предполагает использование современного прогрессивного оборудования. Особенно важна точность чистовой механической обработки, которая обеспечивается, как правило, на заключительной операции шлифования. При изготовлении высокотехнологического изделия на машиностроительных предприятиях применяются различного профиля станки с ЧПУ с цифровой технологией САМ-систем. Как правило, проектируемые управляющие программы ЧПУ не обладают возможностью контроля качества и точности обработки изделия. В итоге появляется потребность в актуализации управляющих программ ЧПУ к ре-

альным технологическим условиям с помощью ручного подбора режимных параметров методом обработки серии пробных заготовок. Это приводит к дополнительным материальным и временным затратам на изготовление продукции.

Прогнозирование точности диаметрального размера и шероховатости поверхностей изделия является актуальной, сложной научно-технической задачей при разработке управляющих программ заключительных операций шлифования с ЧПУ. Прогнозный расчет точности

обработки в автоматизированном процессе шлифования с изменением программных скоростей подачи станка затруднительно выполнить с применением одной формулы: обрабатываемая поверхность изделия постоянно формируется в условиях действия нестабильных технологических факторов при изменяющейся на каждом обороте силе и глубине резания [15]. На рис. 4 представлен пример расположения слоев снимаемого при шлифовании металла в зависимости от количества оборотов и податливости заготовки по разным сечениям.

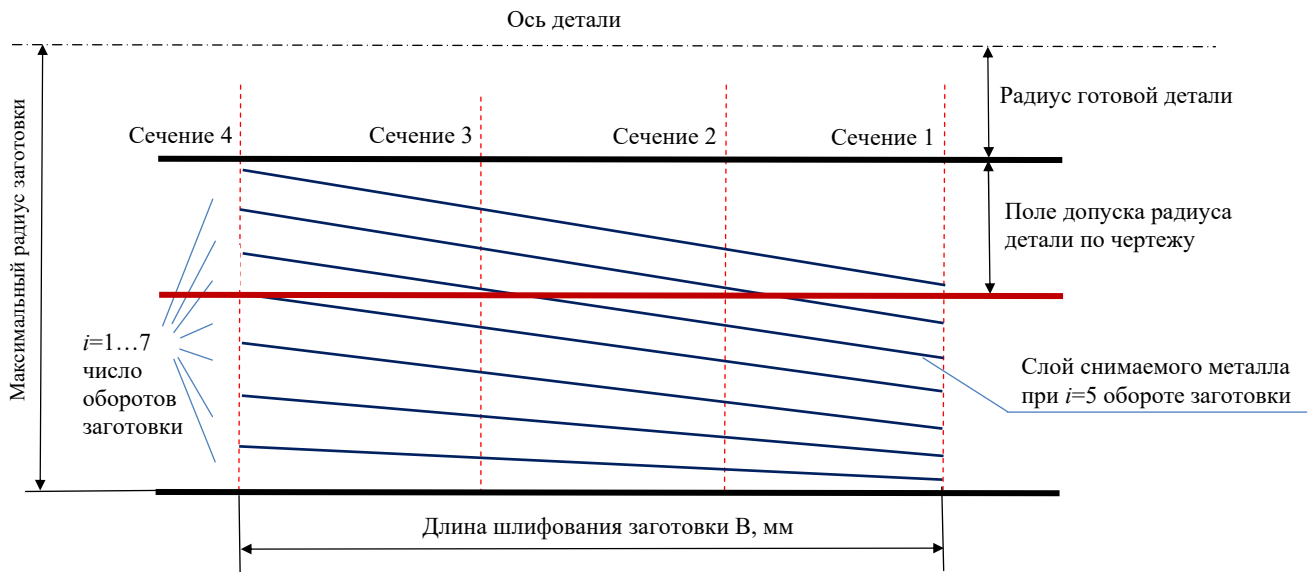


Рис. 4. Распределения слоев снимаемого металла при шлифовании в зависимости от податливости и числа оборотов заготовки

Fig. 4. Distribution of the layers of the metal to be removed during grinding, depending on the malleability and number of revolutions of the workpiece

Обеспечение точности обработки изделия выполняется с помощью внедрения цифрового двойника станочной функции круглого шлифования с моделированием послойного съема припуска и расчетом глубины резания во всех сечениях обрабатываемой поверхности с учетом влияния переменных факторов на каждом обороте заготовки.

Для создания цифрового двойника применена комплексная физико-математическая модель съема припуска за счет учета различных технологических факторов процесса круглого шлифования, в том числе расчетных моделей: силы резания, упругих деформаций технологической системы, формирования погрешности обработки, взаимосвязи программных и фактических подач станка, формирования размеров обработанной поверхности. Перечисленные модели формируют интегральную физико-математическую модель расчета параметров

фактических подач станка в различных сечениях обрабатываемой поверхности заготовки на каждом обороте шпинделя в процессе всего цикла операции шлифования [16].

Технология цифрового двойника обеспечивает расчет текущих размеров обрабатываемой поверхности, прогнозирует погрешность обработки диаметрального размера изделия, проверяет соблюдение требований чертежа по форме и расположению обрабатываемой поверхности. Внедрение технологии цифрового двойника операции круглого шлифования станков с ЧПУ имеет существенную практическую значимость и позволяет за счет автоматизированного контроля управляющих программ достигать требуемую точность обработки изделий, сокращает временные и материальные затраты, снижает брак, повышает производительность технологических операций [17].

В целом система оптимизации циклов управления режимов шлифования станков ЧПУ с применением цифрового двойника функционирует по приведенному на схеме № 5 алгоритму [18]:

- 1) подготовка исходных данных;
- 2) проектируется первоначальная версия оптимального цикла шлифования с применением усредненных постоянных условий шлифования;
- 3) первоначальный оптимальный цикл шлифования проверяется в цифровом двойнике для проверки на устойчивость из-за нестабильных условий обработки с формированием паспорта точности обработки и модели обработанной поверхности детали по завершении цикла шлифования. В паспорте для всех заданных параметров точности приводятся поля допусков и рассеяния погрешности от воздействия переменных факторов;
- 4) В случае выявления брака изделий на основании анализа условий переменных факторов проводится коррекция ограничений целевой

функции с оптимизацией цикла шлифования методом динамического программирования. Функционал цифрового двойника ЦД-П позволяет контролировать и оптимизировать производственные процессы, загрузку оборудования, схему логистических процессов, качество продукции, предоставляет возможность моделировать различные способы производства продукции с имеющимися ограничениями, обеспечивает возможность принятия оптимальных управленческих решений, что особенно актуально для крупных предприятий со сложными технологическими и логистическими процессами с большим информационным потоком. Технология цифровых двойников позволяет объединить все элементы производственной системы и производственных процессов в единую цифровую экосистему, обеспечивая гибкую адаптивную систему управления, обеспечивая взаимодействие между всеми отдельными технологическими процессами и элементами предприятия [19].



Рис. 5. Алгоритм оптимизации управляющей программы станка ЧПУ с применением цифрового двойника

Fig. 5. Algorithm for optimizing the control program of a CNC machine using a digital double

Ключевые процессы на производстве контролируются промышленными системами автоматизации, являющимися основой надежного производства. Цифровой двойник на стадии эксплуатации ЦД-Э является логичным развитием этих систем, предоставляя возможности по пре-

дикативной диагностике, оптимизации, надежному прогнозированию, мониторингу и регулированию производственных процессов, защит от инцидентов и аварий производственных активов, за счет чего достигается реальный экономический эффект [20, 21].

Одним из практических примеров внедрения ЦД-Э является система «ПРАНА» предиктивной прогностики и удаленного мониторинга оборудования парогазового блока ПГУ Ижевской ТЭЦ-1. Система «ПРАНА» функционирует по следующему алгоритму: текущие мгновенные значения эксплуатационных параметров из автоматизированной системы управления технологическим процессом в непрерывном режиме передаются на сервер нижнего уровня, расположенный в специальном отведенном помещении Ижевской ТЭЦ-1, далее по защищенному каналу связи информация транслируется на сервер верхнего уровня в центр прогностики и удаленного мониторинга.

Система производит обработку, анализ, сравнение полученных данных с идеальной расчетной математической моделью объекта, формирует информационные предупреждения эксплуатационному персоналу о зафиксированных отклонениях и деградиационных процессах, рассчитывает значения остаточного ресурса оборудования с определением критических элементов.

С помощью системы «ПРАНА» ведется мониторинг эксплуатационных параметров и прогнозирование технического состояния газовой и паровой турбины, электрических генераторов, газовой дожимной компрессорной станции блока ПГУ Ижевской ТЭЦ-1. В системе «ПРАНА» каждой единице оборудования создается ее цифровой образ – набор математических моделей, описывающих идеальное поведение в различных режимах эксплуатации. Система ежесекундно сравнивает текущее состояние оборудования с моделью. В случае возникновения отклонений система автоматически выстраивает 10 параметров, вносящих наибольший вклад в изменение технического состояния. Далее в работу включаются специалисты, использующие экспертные модули, которые позволяют выработать необходимые рекомендации по устранению возникшего дефекта на основе массива обработанных ранее данных [22].

Системы предиктивной аналитики и мониторинга в своем развитии способствуют качественному переходу от системы планово-предупредительных ремонтов по регламентам к системе ремонтов по фактическому техническому состоянию, то есть от нормативных, формальных сроков ремонта – к рискориентированному, реально профилактическому, когда алгоритмы системы будут в постоянном режиме оценивать реальное состояние деталей, узлов, агрегатов в целом [23, 24].

Цифровые двойники могут использоваться практически в любой отрасли промышленности: транспорт, энергетика, производство, авиация и многое другое [25]. Требуется отметить одно из направлений использования цифровых двойников в качестве тренажерных комплексов с целью обучения эксплуатирующего и обслуживающего персонала [26]. Тренажеры позволяют моделировать редко встречаемые, критически опасные эксплуатационные режимы промышленных объектов. Тренажерное обучение позволяет кардинально повысить уровень практических знаний и навыков персонала, снизить риск возникновения и развития аварийных ситуаций, снизить возможный ущерб для предприятия, населения, окружающей среды [27].

Анализ результатов исследования

Разработка и широкое применение передовых производственных технологий является главным условием процессов преобразования высокотехнологичной промышленности в цифровую. В рамках разработки дорожной карты по направлению развития сквозной цифровой технологии «Новые производственные технологии» Центром компетенций Национальной технологической инициативы «Новые производственные технологии» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (далее – Центр НТИ СПбПУ) было проведено масштабное анкетирование, охватывающее широкий спектр вопросов по технологиям, приоритетным для достижения технологического лидерства и выхода российских компаний на международные рынки [28].

По технологиям математического моделирования и цифровых двойников, по мнению 74 % опрошенных экспертов, отставание России от мирового уровня составляет 5–10 лет, в том числе отмечается функциональное отставание существующих отечественных решений от лучших мировых аналогов. При этом технологии цифровых двойников и технологии компьютерного проектирования и моделирования входят в число наиболее приоритетных технологий для достижения технологического лидерства и выхода отечественных компаний на международные рынки в соответствии с таблицей.

Исходя из результатов опроса фиксируется высокий спрос на исследования и разработки в области технологии цифровых двойников. При этом в России существуют отдельные решения по разработке цифровых двойников в высокотехнологичных отраслях промышленности, имеющих потенциал тиражирования. В первую очередь внедрение решений цифровых двойников происходит

на предприятиях автомобилестроения и машиностроения, авиастроения, нефтегазового и энергетического сектора.

В ПАО «Газпром нефть» ведутся проекты по созданию цифровых двойников скважин, заводов, производственных площадок и месторождений [29]. В ОАО «РЖД» ведется разработка цифровых двойников локомотивов – интеллектуальных моделей, позволяющих осуществлять эксплуатацию, обслуживание и ремонт тягового

подвижного состава по показателям предиктивной диагностики [30]. В госкорпорации «Росатом» разрабатывают цифровую АЭС, дублирующую работу атомной электростанции [31]. Крупнейшая генерирующая компания ПАО «Т Плюс» разрабатывает цифровой двойник теплоэлектроцентрали ТЭЦ и тепловых узлов городов, а также работает над улучшением системы предиктивной диагностики основного оборудования ТЭЦ.

Приоритетные технологии для достижения технологического лидерства и выхода отечественных компаний на международные рынки

Priority technologies for achieving technological leadership and entry of domestic companies into international markets

№ п/п	Приоритетные технологии	Экспертная оценка
1	Математическое моделирование, компьютерный и суперкомпьютерный инжиниринг, имитационное и суперкомпьютерное моделирование	62,2 %
2	Цифровые двойники	52 %
3	Оптимизация – многопараметрическая, многокритериальная, многодисциплинарная, топологическая, топографическая, оптимизация размеров и формы, бионический/генеративный дизайн	43,3 %
4	Технологии разработки и производства материалов с заданными свойствами	38,6%
5	Технологии управления жизненным циклом	36,2 %

Центр НТИ СПбПУ на базе технологии цифрового двойника разработал единую платформу для семейства автомобилей Augus проекта «Кортеж», предназначенных для перевозки и сопровождения первых лиц государства [32]. На данный момент центром НТИ СПбПУ ведется разработка цифрового двойника морского газотурбинного двигателя [33].

Компании-лидеры вносят вклад в реализацию повестки цифровой экономики России, но этот опыт необходимо активно масштабировать, а соответствующие компетенции постоянно развивать. По экспертной оценке, при цифровой трансформации перспективы увеличения показателя прибыли и производительности труда отдельных отраслей составляют дополнительные 20–30 % за десятилетие, в том числе за счет реализации ключевых возможностей технологии цифровых двойников [34, 35]:

1. Снижение себестоимости, времени разработки и производства изделий, объектов.

2. Снижение объемов и повышение результативности проводимых натурных испытаний.

3. Повышение качества проектирования.

4. Ускорение и повышение эффективности инженерных вычислений, сопровождающих разработку изделия, быстрое внесение изменений в конструкцию изделия и удовлетворение всем предъявляемым требованиям.

5. Выбор наилучшего решения среди всех возможных путем вариации всех влияющих на эффективность параметров.

6. Повышение скорости принятия управленческих и инженерных решений при проектировании, производстве и эксплуатации объектов.

7. Проведение многокритериальной оптимизации разрабатываемого изделия в едином информационном пространстве управления инженерной деятельностью.

8. Обеспечение мониторинга производительности изделия и выявление неприемлемых отклонений в функционировании изделия за счет оперативного удаленного управления изделием, его режимом работы, повышение управляемости изделия.

9. Автоматизация и выполнение обоснованного планирования применения изделия в зависимости от его функциональных свойств и технического состояния.

10. Переход на системы организации ремонтов по техническому состоянию с помощью предиктивной аналитики для оптимизации затрат и предотвращения поломок изделия.

11. Прогнозирование срока службы изделий, деталей или компонентов в процессе эксплуатации.

12. Визуализация состояния изделия и процессов, протекающих внутри наиболее важных производственных систем.

13. Минимизация затрачиваемых, в том числе критически важных ресурсов, уменьшение потерь при производстве изделия.

14. Повышение качества, конкурентоспособности, надежности изделий, улучшение характеристик разрабатываемого изделия.

15. Получение надежного, гибкого и эффективного инструмента моделирования.

К ключевым барьерам, препятствующим полномасштабной цифровой трансформации отечественной производственной отрасли [36, 37], в том числе по внедрению технологии цифрового двойника, относятся:

1) организационно-управленческий барьер, связанный с цифровой зрелостью руководителей и существующей организационной структуры управления предприятием, характеризующий степень способности и готовности управленческого звена влиять на процесс внедрения инноваций. Консервативность корпоративной среды, как правило, имеет склонность избегать резких потрясений в организации, связанной с ограниченными возможностями по управлению изменениями;

2) научно-технический барьер в виде недостатка имеющихся технических ресурсов для осуществления инновационной деятельности, в том числе ограничения и отсутствие доступа к современным инновационным технологиям, оборудованию, программному обеспечению в связи с санкциями недружественных западных стран;

3) маркетинговый барьер, отражающий нечеткое представление о потребностях потребителей в рамках внедрения инновации, неверная оценка рынка, неразработанность каналов сбыта;

4) производственный барьер в виде нехватки существующих вычислительных мощностей, неразвитости цифровизации текущих производственных процессов, низкого уровня автоматизации, отсутствия данных о производственных процессах в цифровом виде. Цифровой трансформации препятствует существующее морально устаревшее оборудование и ИТ-системы;

5) финансовый барьер, заключающийся в недостатке средств для финансирования инновационного проекта, отсутствие понимания по его окупаемости, низкой нормы прибыли, высокая стоимость проектов цифровой трансформации;

6) кадровый барьер в виде низкого уровня цифровой грамотности сотрудников, отсутствия

или недостатка компетенций, недостатка опыта внедрения цифровых технологий, нежелания персонала участвовать в цифровой трансформации, дефицита адекватных технических навыков персонала. Цифровизация влечет за собой изменение привычного уклада в организации, внедрение нового оборудования и программного обеспечения, требующего для обслуживания компетентных специалистов;

7) барьер по обеспечению безопасности при использовании цифровыми продуктами и услугами. Переход в цифровое пространство создает большое количество угроз для компании. В первую очередь они связаны с утечкой данных. Процесс цифровизации должен постоянно сопровождаться компетентными специалистами по информационной безопасности, которые смогут обеспечить контролируемый уровень рисков.

К рекомендациям по внедрению технологий цифрового двойника относятся [38, 39]:

1. Предусматривать сквозной жизненный цикл, включающий проектирование, строительство и изготовление, эксплуатацию и обслуживание изделий и объектов.

2. У всех участников проекта должно быть сформировано единое целостное видение роли и ценности внедряемого цифрового двойника для бизнеса.

3. Цифровые двойники быстро развиваются в отдельных функциональных подразделениях, однако новую ценность они могут приобрести только при интеграции процессов и данных в рамках компании в целом, поэтому обязательно необходим системный, комплексный подход.

4. Для извлечения максимальной ценности от цифровых двойников требуется создание и поддержка информационной архитектуры, которая обеспечивает доступ к данным на протяжении всего жизненного цикла.

5. Экспоненциальный рост объемов данных приводит к симметричному увеличению времени по их обработке. При внедрении цифровых двойников необходимо создать правила и систему обращения с данными, поддержки пользователей при проблемах.

6. Внедрение цифровых двойников должно приводить к поиску новых способов сотрудничества между работниками и взаимодействия с информационными моделями в рамках компании.

В конечном итоге цифровые двойники ускоряют цифровую трансформацию путем создания добавленной стоимости продукта с помощью информационных данных, выявления неэффек-

тивности бизнеса, генерации инновационных идей по изменению бизнес-моделей за счет интеллектуальных активов.

Выводы

В современных цифровых технологиях скрыты существенные возможности для развития промышленности, страны, повышения уровня жизни людей. Существующие вычислительные мощности компьютерной индустрии и способность многовариантного моделирования на основе анализа огромного количества данных с выработкой оптимальных решений в режиме реального времени уже сейчас радикально превосходят интеллектуальные способности человека.

Экономическая целесообразность повышения конкурентной способности бизнеса и потребность государственного значения в повышении качества жизни населения влечет за собой неизбежный процесс массового внедрения цифровых технологий.

Цифровой двойник является ключевой интегрирующей технологией цифровой трансформации.

Технология цифрового двойника позволяет проектировать высокотехнологичное оборудование, оптимизировать процесс производства и эксплуатации объектов, контролировать текущее состояние и определять остаточный ресурс эксплуатируемого оборудования, перейти с системы планово-предупредительных ремонтов на систему ремонта по техническому состоянию, выполнить тренажерное обучение эксплуатационного персонала, снизить аварийность опасных производственных объектов. В конечном итоге, применение технологии «цифрового двойника» позволяет сформировать комплексную иерархичную систему проектирования, изготовления и эксплуатации высокотехнологичной продукции с обеспечением стратегической конкурентоспособности отечественного бизнеса.

Библиографические ссылки

1. Боровков А. И., Рябов Ю. А. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки // Цифровая трансформация экономики и промышленности : сборник трудов научно-практической конференции с зарубежным участием / под ред. А. В. Бабкина. 2019. С. 234–245. DOI: 10.18720/IEP/2019.3/25.
2. Абрамов В. И., Кашироков А. С. Цифровые двойники – эффективные инструменты цифровой трансформации ЖКХ // Цифровая экономика и финансы : материалы IV Международной научно-практической конференции. СПб., 2021. С. 139–143.

3. Ласковец С. В., Асланян Е. А. Сравнительный анализ развития цифровой экономики в ЭС и РФ // ЦИТИСЭ. 2022. № 3 (33). С. 29–42. DOI: 10.15350/2409-7616.2022.3.03.

4. Гриневиц Ю. А., Шенишин А. С. Сравнительный анализ развития цифровой экономики в странах большой семерки, России и Китае // Московский экономический журнал. 2019. № 13. С. 223–244. DOI: 10.24411/2413-046X-2019-10319.

5. Корниенко А. В., Мартынец Е. Р., Левенцов В. А. Система комплексных технологических решений с применением цифровых двойников производства // Горизонты экономики. 2022. № 6 (72). С. 68–74.

6. Понятие «цифровой двойник» применительно к социальной системе / А. В. Матяш, П. П. Багрин, В. А. Андреева, М. П. Миронова, М. В. Самосудов // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2022. Т. 12, № 10-1. С. 428–440. DOI: 10.34670/AR.2022.60.42.016.

7. Рахманов М. Л., Шишкин А. В. Современные цифровые технологии и цифровой двойник // Качество и жизнь. 2021. № 2 (30). С. 57–59. DOI: 10.34214/2312-5209-2021-30-2-57-59.

8. Пудовкина О. Е., Балашова Е. А., Бобков Е. О. Методический подход к созданию представлений цифрового двойника в рамках концепции «цифрового производства» // Отходы и ресурсы. 2022. Т. 9, № 1. С. 1–11. DOI: 10.15862/12ITOR122.

9. Высокотехнологичный компьютерный инжиниринг: обзор рынков и технологий / Э. Р. Абдулбариева, Ю. Я. Болдырев, А. И. Боровков, В. И. Жигалов, К. А. Иванова, В. Н. Княгинин, А. А. Кузнецов, И. И. Ласкина, М. С. Липецкая, В. С. Осьмаков, Ю. Б. Ханьжина. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 9–110.

10. Боровков А. И., Щербина Л. А., Рябов Ю. А. Бионический дизайн // Бионика – 60 лет. Итоги и перспективы : сборник статей Первой Международной научно-практической конференции / под ред. А. П. Карпенко. М., 2022. С. 18–29. DOI: 10.53677/9785919160496_18_29.

11. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК / А. И. Боровков, Ю. А. Рябов, К. В. Кукушкин, В. М. Марусева, В. Ю. Кулемин // Вестник Восточно-Сибирской Открытой Академии. 2019. № 32. С. 1–39.

12. Пономарев К. С., Феофанов А. Н., Гришина Т. Г. Стратегия цифрового двойника производства как метод цифровой трансформации предприятия // Вестник современных технологий. 2019. № 4 (16). С. 23–30.

13. Опыт применения технологий суперкомпьютерного инжиниринга в деятельности инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» / М. В. Алешин, Ю. Я. Болдырев, А. И. Боровков, И. С. Давыдов, О. И. Клявин, А. Ю. Тамм, А. П. Петкова // Суперкомпьютерные дни в России : труды международной конференции. Суперкомпьютерный консорциум университетов России, Российская академия наук. 2018. С. 717–727.

14. *Фомичева Т. Л.* Применение технологии цифровых двойников в автомобильной промышленности: российский опыт // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2021. Т. 11, № 12-1. С. 181–186. DOI: 10.34670/AR.2021.24.88.003.
15. *Акинцева А. В.* Основные этапы моделирования послыонного съема металла с применением цифрового двойника операции круглого шлифования с ЧПУ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2020. Т. 20. № 3. С. 48–58. DOI: 10.14529/engin200305.
16. *Акинцева А. В., Переверзев П. П.* Разработка аналитической модели съема металла для цифрового двойника круглого шлифования // Инновационные технологии в машиностроении : Международная научно-практическая заочная конференция. Ульяновск, 2020. С. 73–78.
17. *Акинцева А. В., Переверзев П. П., Дегтярева-Кашутина А. С.* Цифровой двойник формообразования обрабатываемой поверхности нежесткого вала с эллипсным профилем при круглом врезном шлифовании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2021. Т. 19. № 4. С. 98–106. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-98-106.
18. *Акинцева А. В., Переверзев П. П., Алсигар М. К.* Проектирование оптимального цикла шлифования с использованием цифрового двойника // Инновационные технологии в металлообработке : Всероссийская научно-практическая заочная конференция с международным участием: сборник научных трудов. 2019. С. 88-93.
19. *Корниенко А. В., Мартынец Е. Р., Левенцов В. А.* Система комплексных технологических решений с применением цифровых двойников производства // Горизонты экономики. 2022. № 6 (72). С. 68–74.
20. *Грабчак Е. П., Логинов Е. Л.* «Цифровые двойники» АЭС и ТЭС как элементы цифровых агломераций в энергетической суперсистеме // Современные проблемы электроэнергетики и пути их решения : материалы V Всероссийской научно-технической конференции. 2019. С. 155–159.
21. *Романовская В. Е.* «Цифровой двойник» как основа цифрового проектирования и моделирования // Цифровые технологии в экономике и промышленности (ЭКОПРОМ-2019) : сборник трудов национальной научно-практической конференции с международным участием / под ред. А. В. Бабкина. 2019. С. 208–214. DOI: 10.18720/IEP/2019.5/27.
22. *Шабунин А. С., Чернецкий М. Ю.* Физико-математические модели газотурбинных установок в системе предиктивной аналитики ПРАНА // Научный журнал Российского газового общества. 2022. № 4 (36). С. 72–81. DOI: 10.55557/2412-6497-2022-4-72-81.
23. Создание систем предиктивной аналитики для энергетических объектов / А. В. Андрюшин, И. А. Щербатов, Г. Н. Цуриков, Ф. М. Титов // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2019) : материалы двенадцатой международной конференции. 2019. С. 452–460. DOI: 10.25728/mlsd.2019.2.0452.
24. *Тарануха Н. Л., Иванова С. С., Панков С. Н.* Обеспечение энергоэффективности тепловых электрических станций и тепловых сетей через цифровую трансформацию // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 1. С. 45–58.
25. *Леонтьева И. Н., Бурцев Д. С.* Подходы к применению цифровых двойников системными интеграторами и производителями робототехники // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. 2022. № 2. С. 75–83. DOI: 10.17586/2310-1172-2022-16-2-75-83.
26. *Шнак П. С., Сычева Е. Г., Меринская Е. Е.* Концепция цифровых двойников как современная тенденция цифровой экономики // Вестник Омского университета. Серия: Экономика. 2020. Т. 18, № 1. С. 57–68. DOI: 10.24147/1812-3988.2020.18(1).57-68.
27. *Белоглазов И. И., Петров П. А.* Разработка цифровых двойников для обучения операторов технологического процесса // Инженерное образование в контексте будущих промышленных революций – СИНЕРГИЯ-2020 : сборник научных статей международной сетевой научно-практической конференции. Казанский национальный исследовательский технологический университет. 2020. С. 44–50.
28. Дорожная карта по развитию сквозной цифровой технологии «новые производственные технологии». Результаты и перспективы / А. И. Боровков, О. И. Рождественский, К. В. Кукушкин, Е. И. Павлова, А. Ю. Тарши // Инновации. 2019. № 11 (253). С. 89–104. DOI: 10.26310/2071-3010.2019.253.11.011.
29. *Паришина И. С., Фролов Е. Б.* Разработка цифрового двойника производственной системы на базе современных цифровых технологий // Экономика промышленности. 2020. Т. 13, № 1. С. 29–34. DOI: 10.17073/2072-1633-2020-1-29-34.
30. *Соколовский А. В.* Развитие цифрового двойника состава пассажирского поезда для повышения эффективности организации перевозок // Актуальные проблемы железнодорожной науки глазами молодых исследователей : сборник материалов круглого стола, посвященного Дню железнодорожника. М., 2022. С. 147–155.
31. *Жарко Е. Ф.* Интеллектуализированные системы поддержки оператора АЭС: гибкий моделирующий комплекс и цифровые двойники // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2020 : труды Тринадцатой Международной конференции / под общ. ред. С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна. 2020. С. 1381–1389. DOI: 10.25728/mlsd.2020.1381.
32. *Пономарев К. С., Шутиков М. А., Феофанов А. Н.* Цифровой двойник как инструмент цифровой трансформации предприятия // Вестник МГТУ «Станкин». 2019. № 4 (51). С. 19–23.
33. Возможности цифрового двойника ГТД на базе цифровой платформы CML-BENCH™ / Ю. А. Горский, Т. А. Паутова, П. А. Гаврилов, А. Ю. Тамм, А. И. Боровков // Климовские чтения – 2022: перспективные направления развития авиадвигателестроения : сборник статей научно-технической

конференции. СПб., 2022. С. 189–196. DOI: 10.53454/9785986206257_189.

34. Абрамов В. И., Туйцына А. А. Цифровые двойники – эффективные инструменты цифровой трансформации компании // Управление бизнесом в цифровой экономике : сборник тезисов выступлений Четвертой Международной конференции / под общ. ред. И. А. Аренкова, М. К. Ценжарик. СПб., 2021. С. 33–39.

35. Дунина А. А. Цифровые двойники на производстве как одно из направлений цифровой трансформации экономики // Стратегии бизнеса. 2022. Т. 10, № 5. С. 114–116. DOI: 10.17747/2311-7184-2022-5-114-116.

36. Филиппов Е. С. Спецификация барьеров при проведении цифровой трансформации в организации // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2022. Т. 12, № 3-1. С. 486–493. DOI: 10.34670/AR.2022.39.11.056.

37. Короткова А. А., Татаренко Л. Ю. «Цифровые двойники» в условиях развития цифровой экономики // Цифровая экономика: перспективы развития и совершенствования : сборник научных статей Международной научно-практической конференции. Курск, 2020. С. 124–127. DOI: 10.47581/2020/10.23.PS85/030.

38. Митяева Н. В., Заводилю О. В. Барьеры цифровой трансформации и пути их преодоления // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. 2019. № 3 (77). С. 20–24.

39. Кошелева О. Э., Павлова А. О. Роль интеллектуальных ресурсов России в расширении сферы применения цифровых двойников и ускорении цифрового прогресса // Бюллетень инновационных технологий. 2022. Т. 6. № 4 (24). С. 29–33.

References

1. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A. *Cifrovye dvojniki: opredelenie, podhody i metody razrabotki* [Digital twins: definition, approaches and methods of development]. [Digital transformation of the economy and industry]. Proceedings of the scientific and practical conference with foreign participation. Edited by A.V. Babkin. 2019. Pp. 234–245. (in Russ.). DOI: 10.18720/IEP/2019.3/25.

2. Abramov V.I., Kashirokov A.S. *Tsifrovye dvojniki – effektivnye instrumenty tsifrovoi transformatsii ZhKKh* [Digital twins – effective tools of digital transformation of housing and communal services]. *Tsifrovaya ekonomika i finansy : materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proc. Digital economy and finance: materials of the IV International Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg, 2021. Pp. 139–143 (in Russ.).

3. Laskovets S.V., Aslanyan E.A. *Sravnitel'nyj analiz razvitiya cifrovoj ekonomiki v ES i RF* [Comparative analysis of the development of the digital economy in the EU and the Russian Federation]. CITISE. 2022. No. 3. Pp. 29–42. (in Russ.). DOI: 10.15350/2409-7616.2022.3.03.

4. Grinevich Yu.A., Shenshin A.S. *Sravnitel'nyj analiz razvitiya cifrovoj ekonomiki v stranah bol'shoj semerki,*

Rossii i Kitae [Comparative analysis of the development of the digital economy in the Big Seven countries, Russia and China]. Moscow Economic Journal. 2019. No. 13. Pp. 223–244 (in Russ.). DOI: 10.24411/2413-046X-2019-10319.

5. Kornienko A.V., Martynets E.R., Leventsov V.A. *Sistema kompleksnyh tekhnologicheskikh reshenij s primeneniem cifrovyyh dvojnikov proizvodstva* [System of complex technological solutions using digital production doubles]. Horizons of Economics. 2022. No. 6. Pp. 68–74 (in Russ.).

6. Matyash A.V., Bagrin P.P., Andreeva V.A., Mironova M.P., Samosudov M.V. *Ponyatie «cifrovoj dvojnika» primenitel'no k social'noj sisteme* [The concept of "digital double" in relation to the social system]. Economics: yesterday, today, tomorrow. 2022. Vol. 12. No. 10-1. Pp. 428–440 (in Russ.). DOI: 10.34670/AR.2022.60.42.016.

7. Rakhmanov M.L., Shishkin A.V. *Sovremennye cifrovye tekhnologii i cifrovoj dvojniki* [Modern digital technologies and digital double]. Quality and life. 2021. No. 2. Pp. 57–59 (in Russ.). DOI: 10.34214/2312-5209-2021-30-2-57-59.

8. Pudovkina O.E., Balashova E.A., Bobkov E.O. *Metodicheskij podhod k sozdaniyu predstavlenij cifrovogo dvojnika v ramkah koncepcii «cifrovogo proizvodstva»* [Methodical approach to the creation of representations of a digital double within the framework of the concept of "digital production"]. Waste and resources. 2022. Vol. 9, no. 1. Pp. 1–11 (in Russ.). DOI: 10.15862/12ITOR122.

9. Abdulbarieva E.R., Boldyrev Yu.Ya., Borovkov A.I., Zhigalov V.I., Ivanova K.A., Knyaginina V.N., Kuznetsov A.A., Laskina I.I., Lipetsk M.S., Osmakov V.S., Hanzhina Yu.B. *Vysokotekhnologichnyj komp'yuternyj inzhiniring: obzor rynkov i tekhnologij* [High-tech computer engineering: overview of markets and technologies]. St. Petersburg: Publishing House of Polytechnic. un-ta, 2014. Pp. 9–110. (in Russ.).

10. Borovkov A.I., Shcherbina L.A., Ryabov Yu.A. *Bionicheskij dizajn* [Bionic design]. *Bionika-60 let. Itogi i perspektivy : sbornik statei Pervoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proc. Bionics - 60 years. Results and prospects. Collection of articles of the First International Scientific and Practical Conference]. Moscow, 2022. pp. 18–29 (in Russ.). DOI: 10.53677/9785919160496_18_29.

11. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Kukushkin K.V., Maruseva V.M., Kulemin V.Yu. *Cifrovye dvojniki i cifrovaya transformatsiya predpriyatij OPK* [Digital twins and digital transformation of agricultural enterprises]. Bulletin of the East Siberian Open Academy. 2019. No. 32. Pp. 1–39 (in Russ.).

12. Ponomarev K.S., Feofanov A.N., Grishina T.G. *Strategiya cifrovogo dvojnika proizvodstva kak metod cifrovoj transformatsii predpriyatiya* [The strategy of the digital twin of production as a method of digital transformation of the enterprise]. Bulletin of Modern Technologies. 2019. No. 4. Pp. 23–30 (in Russ.).

13. Aleshin M.V., Boldyrev Y.Ya., Borovkov A.I., Davydov I.S., Klyavin O.I., Tamm A.Yu., Petkova A.P. *Opyt primeneniya tekhnologij superkomp'yuternogo in-*

zhiniringa v deyatel'nosti inzhiniringovogo centra «Centr komp'yuternogo inzhiniringa» [The experience of using supercomputer engineering technologies in the activities of the engineering center "Computer Engineering Center"]. *Superkomp'yuternye dni v Rossii : trudy mezhdunarodnoi konferentsii. Superkomp'yuternyi konsortsiy universitetov Rossii, Rossiiskaya akademiya nauk* [Supercomputer days in Russia. Proceedings of the International Conference. Supercomputer Consortium of Russian Universities, Russian Academy of Sciences]. 2018. pp. 717-727. (in Russ.).

14. Fomicheva T.L. Application of digital twins technology in the automotive industry: Russian experience [Primenenie tekhnologii cifrovyyh dvoynikov v avtomobil'noy promyshlennosti: rossijskiy opyt]. *Economy: yesterday, today, tomorrow*. 2021. Vol. 11. No. 12-1. pp. 181-186 (in Russ.). DOI: 10.34670/AR.2021.24.88.003.

15. Akimtseva A.V. *Osnovnye etapy modelirovaniya poslojnogo s'ema metalla s primeneniem cifrovogo dvoynika operacii kruglogo shlifovaniya s CHPU* [The main stages of modeling layer-by-layer metal removal using a digital double of a round grinding operation with CNC]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 20, no. 3. Pp. 48-58 (in Russ.). DOI: 10.14529/engin200305.

16. Akimtseva A.V., Pereverzev P.P. *Razrabotka analiticheskoy modeli s'ema metalla dlya cifrovogo dvoynika kruglogo shlifovaniya* [Development of an analytical model of metal removal for a digital double of round grinding]. *Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii : Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya zaochnaya konferentsiya* [Proc. Innovative technologies in mechanical engineering. International Scientific and Practical Correspondence Conference]. Ulyanovsk, 2020. Pp. 73-78 (in Russ.).

17. Akimtseva A.V., Pereverzev P.P., Degtyareva-Kashutina A.S. *Cifrovoy dvoynik formoobrazovaniya obrabatyvaemoj poverhnosti nezhestkogo vala s ellipsnym profilem pri kruglom vreznom shlifovanii* [Digital twin of the shaping of the treated surface of a non-rigid shaft with an elliptical profile with round mortise grinding]. *Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*. 2021. Vol. 19, no. 4. Pp. 98-106 (in Russ.). DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-98-106.

18. Rakintseva A.V., Pereverzev P.P., Alsigar M.K. *Proektirovanie optimal'nogo cikla shlifovaniya s ispol'zovaniem cifrovogo dvoynika* [Designing an optimal grinding cycle using a digital double]. *Innovatsionnye tekhnologii v metalloobrabotke : Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya zaochnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem: sbornik nauchnykh trudov* [Innovative technologies in metalworking. All-Russian Scientific and practical correspondence Conference with international participation: collection of scientific papers]. 2019. Pp. 88-93 (rus).

19. Kornienko A.V., Martynets E.R., Leventsov V.A. *Sistema kompleksnykh tekhnologicheskikh reshenij s primeneniem cifrovyyh dvoynikov proizvodstva* [System of complex technological solutions using digital production

doubles]. *Horizons of Economics*. 2022. No. 6. Pp. 68-74 (in Russ.).

20. Grabchak E.P., Loginov E.L. *"Cifrovyye dvoyniki" AES i TES kak elementy cifrovyyh aglomeratsiy v energeticheskoy supersisteme* ["Digital twins" of nuclear power plants and thermal power plants as elements of digital agglomerations in the energy supersystem]. *Sovremennyye problemy elektroenergetiki i puti ikh resheniya : materialy V Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Modern problems of electric power industry and ways to solve them. Materials of the V All-Russian Scientific and Technical Conference]. 2019. Pp. 155-159 (in Russ.).

21. Romanovskaya V.E. *"Cifrovoy dvoynik" kak osnovnaya cifrovogo proektirovaniya i modelirovaniya* ["Digital twin" as the basis of digital design and modeling]. *Tsifrovyye tekhnologii v ekonomike i promyshlennosti (EKOPROM-2019) : sbornik trudov natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Digital technologies in Economics and industry (ECOPROM-2019). Proceedings of the National Scientific and practical conference with international participation]. Edited by A.V. Babkin. 2019. Pp. 208-214 (in Russ.). DOI: 10.18720/IEP/2019.5/27.

22. Shabunin A.S., Chernetsky M.Yu. *Fiziko-matematicheskie modeli gazoturbinykh ustanovok v sisteme prediktivnoy analitiki PRANA* [Physico-mathematical models of gas turbine installations in the system of predictive analytics PRANA]. *Scientific Journal of the Russian Gas Society*. 2022. No. 4. Pp. 72-81 (in Russ.). DOI: 10.55557/2412-6497-2022-4-72-81.

23. Andryushin A.V., Shcherbatov I.A., Tsurikov G.N., Titov F.M. *Sozdanie sistem prediktivnoy analitiki dlya energeticheskikh ob'ektov* [Creation of predictive analytics systems for energy facilities]. *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2019) : materialy dvenadtsatoi mezhdunarodnoi konferentsii* [Management of the development of large-scale systems (MLSD'2019). Materials of the twelfth International Conference]. 2019. Pp. 452-460 (in Russ.). DOI: 10.25728/mlsd.2019.2.0452.

24. Taranukha N.L., Ivanova S.S., Pankov S.N. *Obespechenie energoeffektivnosti teplovykh elektricheskikh stantsiy teplovykh setey cherez cifrovuyu transformatsiyu* [Ensuring energy efficiency of thermal power plants and heating networks through digital transformation]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023. Vol. 21, no. 1. Pp. 45-58 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-45-58.

25. Leontieva I.N., Burtsev D.S. *Podhody k primeneniyu cifrovyyh dvoynikov sistemnymi integratorami i proizvoditelyami robototekhniki* [Approaches to the use of digital twins by system integrators and robotics manufacturers]. *Scientific Journal of ITMO Research Institute. Series: Economics and Environmental Management*. 2022. No. 2. Pp. 75-83 (in Russ.). DOI: 10.17586/2310-1172-2022-16-2-75-83.

26. Shpak P.S., Sycheva E.G., Mirinskaya E.E. *Koncepciya cifrovyyh dvoynikov kak sovremennaya tendentsiya cifrovoy ekonomiki* [The concept of digital twins as a modern trend of the digital economy]. *Bulletin of Omsk University. Series: Economics*. 2020. Vol. 18, no. 1. Pp.

57-68 (in Russ.). DOI: 10.24147/1812-3988.2020.18(1).57-68.

27. Beloglazov I.I., Petrov P.A. *Razrabotka cifrovyyh dvoynikov dlya obucheniya operatorov tekhnologicheskogo processa* [Development of digital doubles for training process operators]. *Inzhenernoe obrazovanie v kontekste budushchikh promyshlennykh revolyutsii – SINERGIYA-2020 : sbornik nauchnykh statei mezhdunarodnoi setevoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Engineering education in the context of Future Industrial Revolutions - SYNERGY 2020. Collection of scientific articles of the international network scientific and practical conference. Kazan National Research Technological University]. 2020. Pp. 44-50 (in Russ.).

28. Borovkov A.I., Rozhdestvensky O.I., Kukushkin K.V., Pavlova E.I., Torshin A.Yu. *Dorozhnaya karta po razvitiyu skvoznoj cifrovoj tekhnologii «novye proizvodstvennye tekhnologii»*. *Rezul'taty i perspektivy* [Roadmap for the development of end-to-end digital technology "new production technologies". Results and prospects]. *Innovations*. 2019. No. 11. Pp. 89-104 (in Russ.). DOI: 10.26310/2071-3010.2019.253.11.011.

29. Parshina I.S., Frolov E.B. *Razrabotka cifrovogo dvoynika proizvodstvennoy sistemy na baze sovremennykh cifrovyyh tekhnologiy* [Development of a digital twin of a production system based on modern digital technologies]. *Industrial economics*. 2020. Vol. 13, no. 1. Pp. 29-34 (in Russ.). DOI: 10.17073/2072-1633-2020-1-29-34.

30. Sokolovsky A.V. *Razvitie cifrovogo dvoynika sostava passazhirskogo poezda dlya povysheniya effektivnosti organizatsii perevozok* [The development of a digital double of a passenger train composition to improve the efficiency of transportation organization]. *Aktual'nye problemy zhelezodorozhnoi nauki glazami molodykh issledovatelei : sbornik materialov kruglogo stola, posvyashchennogo Dnyu zhelezodorozhnik* [Actual problems of railway science through the eyes of young researchers. collection of materials of the round table dedicated to the Railway Worker's Day]. Moscow, 2022. Pp. 147-155 (in Russ.).

31. Zharko E.F. *Intellektualizirovannyye sistemy podderzhki operatora AES: gibkij modeliruyushchij kompleks i cifrovyye dvoyniki* [Intellectualized NPP operator support systems: flexible modeling complex and digital twin]. *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem MLS D'2020 : trudy Trinadtsatoi Mezhdunarodnoi konferentsii / pod obshch. red. S. N. Vasil'eva, A. D. Tsvirkuna* [Managing the development of large-scale MLS D systems'2020. Proceedings of the thirteenth international conference. Under the general editorship of S.N. Vasiliev, A.D. Tsvirkun]. 2020. Pp. 1381-1389 (in Russ.). DOI: 10.25728/mlsd.2020.1381.

32. Ponomarev K.S., Shutikov M.A., Feofanov A.N. *Cifrovoy dvoynik kak instrument cifrovoj transformatsii predpriyatiya* [The digital double as an instrument of

digital transformation of the enterprise]. *Bulletin of MSTU "Stankin"*. 2019. No. 4. Pp. 19-23 (in Russ.).

33. Gorsky Yu.A., Pautova T.A., Gavrillov P.A., Tamm A.Yu., Borovkov A.I. *Vozmozhnosti cifrovogo dvoynika GTD na baze cifrovoj platformy CML-BENCH™* [The possibilities of a digital twin of the GTD based on the digital platform CML-BENCH™]. *Klimovskie chteniya – 2022: perspektivnyye napravleniya razvitiya aviadvigatelestroeniya : sbornik statei nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Klimov Readings - 2022: promising directions for the development of aircraft engine building. Collection of articles of the scientific and technical conference]. Saint Petersburg, 2022. Pp. 189-196 (in Russ.). DOI: 10.53454/9785986206257_189.

34. Abramov V.I., Tuitsyna A.A. *Cifrovyye dvoyniki – effektivnyye instrumenty cifrovoj transformatsii kompanii* [Digital twins – effective tools of digital transformation of the company]. [Business management in the digital economy. Collection of abstracts of speeches of the Fourth International Conference. Under the general editorship of I.A. Arenkov, M.K. Tsenzharik]. St. Petersburg, 2021. Pp. 33-39 (in Russ.).

35. Dunina A.A. *Cifrovyye dvoyniki na proizvodstve kak odno iz napravleniy cifrovoj transformatsii ekonomiki* [Digital twins in production as one of the directions of digital transformation of the economy]. *Business strategies*. 2022. Vol. 10, no. 5. Pp. 114-116. DOI: 10.17747/2311-7184-2022-5-114-116 (in Russ.).

36. Filippov E.S. *Spezifikatsiya bar'erov pri provedenii cifrovoj transformatsii v organizatsii* [Specification of barriers during digital transformation in an organization]. *Economy: yesterday, today, tomorrow*. 2022. Vol. 12, no. 3-1. Pp. 486-493 (in Russ.). DOI: 10.34670/AR.2022.39.11.056.

37. Korotkova A.A., Tatarenko L.Yu. *«Cifrovyye dvoyniki» v usloviyakh razvitiya cifrovoj ekonomiki* ["Digital twins" in the conditions of digital economy development]. *Tsifrovaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya : sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proc. Digital economy: prospects for development and improvement. collection of scientific articles of the International Scientific and Practical Conference]. Kursk, 2020. Pp. 124-127 (in Russ.). DOI: 10.47581/2020/10.23 .PS85/030.

38. Mityaeva N.V., Zavodilo O.V. *Bar'ery cifrovoj transformatsii i puti ih preodoleniya* [Barriers of digital transformation and ways to overcome them]. *Bulletin of the Saratov State Socio-Economic University*. 2019. No. 3. Pp. 20-24 (in Russ.).

39. Kosheleva O.E., Pavlova A.O. *Rol' intellektual'nykh resursov Rossii v rasshirenii sfery primeneniya cifrovyyh dvoynikov i uskorenii cifrovogo progressa* [The role of Russia's intellectual resources in expanding the scope of digital twins and accelerating digital progress]. *Bulletin of Innovative Technologies*. 2022. Vol. 6, no. 4. Pp. 29-33 (in Russ.).

Digital Twin is an Effective Tool for Digital Transformation of Industrial Enterprises

N. L. Taranukha, DSc. Economics, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

S. V. Semenova, PhD in Economics, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

S. N. Pankov, Master Degree Student Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

The article presents the results of a study of digital transformation processes taking place on scientific and industrial enterprises using digital twin technology. The degree of introduction of digital technologies and the level of labor productivity in the developed countries and in Russia were considered. The concept, definition, properties and characteristics of digital twin technology were studied. The applied methods of digital design and modeling in the digital twin technology were investigated.

The author analyzes the features of creation, functionality, and the advantages of digital twin technology at various stages of the object's life cycle – during design, production and operation. Practical examples of digital twins application in the domestic industry are given: the design of a premium-class car of the "Tuple" project, the optimization of technological grinding operations of product manufacturing, the introduction of a predictive prognostic system and monitoring of modern high-tech equipment of the combined-cycle unit of the Izhevsk CHP-1 PSU for monitoring the operational condition, reliable forecasting of technological processes, protection from incidents and accidents. The application of digital twin technology as a training complex to train the operational personnel of industrial facilities based on modeling of rarely encountered and critically dangerous operating modes of industrial facilities is investigated.

The Russian market of digital design and modeling is studied and key leaders were identified. The top digital technologies to achieve technological leadership of domestic companies are summarized.

As a result of the research, the key capabilities of digital twin technology and barriers constraining the processes of full-scale digital transformation of scientific and industrial enterprises are identified. Recommendations for the successful implementation and development of digital twin technology are proposed. The motivating factors of state support for the digital transformation of domestic business are summarized.

Keywords: digital transformation, digital technologies, digital twin.

Получено: 06.06.23

Образец цитирования

Тарануха Н. Л., Семёнова С. В., Панков С. Н. Цифровой двойник – эффективный инструмент цифровой трансформации промышленных предприятий // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 3. С. 11–26. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-11-26.

For Citation

Taranukha N.L., Semenova S.V., Pankov S.N. [Digital Twin is an Effective Tool for Digital Transformation of Industrial Enterprises]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 11-26 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-11-26.