

УДК 519.876.5
 DOI 10.17513/snt.40611

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ И МЕТОДИК ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В СБОРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННЫХ ДАННЫХ И УСТАРЕВШЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Лазарев М.С., Ёлшин В.В.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
 «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск,
 Российская Федерация, e-mail: mark_lazarev_99@mail.ru*

Цель статьи заключается в анализе и систематизации рисков реализации цифровых двойников на небольших производственных сборочных участках и поиске предложений по созданию цифрового двойника в неблагоприятных условиях. Материалы и методы исследования – данные об устаревших сборочных участках с низким уровнем автоматизации и анализ текущего состояния цифровизации предприятий и производств. Результаты: в статье рассмотрены особенности и проблемы внедрения технологии цифровых двойников в небольших производственных системах, которые функционируют в условиях ограниченного объема данных, фрагментированной инфраструктуры и низкой цифровой зрелости установленного оборудования. Проанализированы ключевые технологические и организационные риски, возникающие при проектировании цифровых двойников в подобных условиях, а также ограничивающие факторы, влияющие на точность моделей и эффективность их применения. Представлена методология разработки цифрового двойника, ориентированная на предприятия с минимальным уровнем автоматизации, включающая подходы к сбору, структурированию и анализу данных при отсутствии современных средств мониторинга и аналитики. Внимание удалено выбору инструментов, позволяющих сформировать базу данных из разрозненных и низкокачественных источников, а также методам упрощенного моделирования. Предложены меры по снижению технических и организационных рисков на этапах внедрения и эксплуатации цифровых двойников, направленные на постепенное повышение цифровой зрелости производства и обеспечение устойчивого роста эффективности производственных процессов, включающие в себя подготовку персонала, пути оптимизации существующих рабочих процессов и поиска потенциального поэтапного расширения функциональности цифрового двойника по мере повышения зрелости производственной инфраструктуры предприятия. Выводы: переход к гибридным моделям, использующим исторические данные, виртуальные сенсоры и экспертные знания, позволяет поэтапно внедрять цифровую автоматизацию, оптимизировать сборочные процессы и получать экономический эффект без значительных первоначальных инвестиций.

Ключевые слова: сборочное производство, цифровизация, цифровой двойник, индустрия 4.0, гибридные модели

AN ANALYSIS OF THE PROBLEMS AND METHODS FOR PRODUCTING DIGITAL TWINS IN ASSEMBLY PRODUCTON UNDER CONDITIONS OF LIMITED DATA AND OUTDATED EQUIPMENT

Lazarev M.S., Yolshin V.V.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
 "Irkutsk National Research Technical University", Irkutsk,
 Russian Federation, e-mail: mark_lazarev_99@mail.ru*

The purpose of this article is to analyze and systematize the risks of implementing digital twins in low-production assembly areas and to identify proposals for creating twins in stable conditions. The materials and methods of the study include data on controlled assembly areas with a high level of automation and an analysis of the current state of digitalization of enterprises and production facilities. Results: The article examines the features and challenges of digital twin technology in low-production enterprises, which operate in conditions of limited data volumes and fragmented and low digital maturity of the installed equipment. Key technologies and organizational risks arising during the design of digital twins in any environment are analyzed, as well as limiting factors affecting the accuracy of models and the effectiveness of their application. A methodology for developing a dual twin is presented, targeted at enterprises with a significant level of automation, including approaches to collecting, structuring, and analyzing data in the absence of modern tools and analytics. Attention is paid to the selection of tools for processing data from disparate and low-quality sources, as well as simplified modeling methods. Measures are proposed to reduce technical and organizational risks in the area of provision and operation of digital twins, aimed at gradually increasing the digital maturity of production and ensuring the growth of efficiency of production processes, including personnel training, ways to optimize work processes, and determining a regular, step-by-step expansion of the twin indicators as the maturity of the enterprise's production activities increases. Conclusions: The transition to hybrid models using historical data, virtual sensors, and expert knowledge enables the gradual implementation of digital automation, optimization of assembly processes, and economic benefits without significant initial investment.

Keywords: assembly production, digitalization, digital twin, Industry 4.0, hybrid models

Введение

Технология цифровых двойников появилась как концепция в рамках индустрии 4.0 [1] и отражает общемировые тенденции развития четвертой промышленной революции, цифровой трансформации промышленных производств, использования Больших данных и сохранения конкурентоспособности промышленного комплекса, а также характеризуется ежегодным приростом инвестиций в данную сферу [2], поэтому в настоящее время все чаще рассматривается современным производством как неотъемлемая часть технологического прогресса в области цифровизации предприятий, предлагая в перспективе удобный контроль за производственными процессами, повышение производительности, уменьшение брака, совокупное снижение расходов. Исследования ближайших лет показывают активное стремление крупных компаний к внедрению цифровых двойников практически во всех сферах деятельности по всему миру. Отечественные компании с 2020-х годов, хоть и существенно отстают от мирового уровня, но с каждым годом сокращают разрыв [3].

Цифровой двойник, являясь виртуальной копией физического объекта, процесса или даже поведенческих моделей людей в заданных ситуациях, способен синхронизироваться с реальным аналогом и при помощи датчиков действовать в режиме реального времени, что позволяет повышать производительность, уменьшать брак и снижать расходы. Однако современные подходы к цифровизации сборочного производства и построению цифровых двойников решаемы для крупных предприятий, но становятся для малых и средних предприятий сложно реализуемой задачей, поскольку такие подходы требуют полноценной инфраструктуры, предполагающей наличие SCADA, MES-систем, больших объемов цифровизированных данных, компетентных специалистов. Даже в рамках крупных предприятий, имеющих в своем составе большое количество разных специализированных цехов и обеспечивающих полный цикл изготовления сложных изделий, могут быть участки с морально и технически устаревшим оборудованием и низкой цифровой зрелостью. К примеру, участки сборки промышленных рукавов с арматурой (сборочных рукавов) преимущественно используют ручной труд и механизированные операции без наличия цифрового контроля.

Цель исследования – анализ и систематизация рисков, возникающих при реализации цифрового двойника в небольших

производствах, а также предложение методологии создания цифрового двойника в условиях ограниченного доступа к цифровым данным и устаревшего оборудования.

Материалы и методы исследования

К материалам исследования относятся данные о сборочных участках и цехах с устаревшим оборудованием и низким уровнем автоматизации. К методам исследования – системный анализ проблем цифровизации старых производств и текущего состояния их цифровизации посредством поиска и анализа данных, приведенных в материалах исследований научных статей.

Результаты исследования и их обсуждение

Цифровой двойник представляет собой совокупность алгоритмов машинного обучения, инструментов визуализации, данных с оборудования, собранных при помощи датчиков и синтеза моделей [4].

В условиях небольшого сборочного производства функционал цифрового двойника включает в себя:

- симуляцию и оптимизацию сборочного процесса на каждом этапе пооперационного технологического процесса;
- мониторинг и прогнозирование технического состояния оборудования (к нему относятся, в зависимости от профиля выполняемых работ, различные станки, промышленные роботы при роботизированном производстве, оснастка);
- повышение качества посредством статистического сбора и анализа данных о получаемых отклонениях и дефектах в процессе работы производства.

В общем случае риски, возникающие при внедрении цифрового двойника, можно разделить на несколько категорий, представленных в таблице 1, и разделить их по степени влияния.

Рассмотрим приведенные в таблице риски более подробно.

1. Организационные риски. Сборочное производство на данный момент, особенно мелкое, занимающееся единичным и мелкосерийным выпуском изделий, большей частью слабо автоматизировано или не автоматизировано вовсе, что приводит к преимущественно ручному или механизированному способу изготовления продукции. Такой способ можно охарактеризовать как «проверенный годами», но он влечет за собой отсутствие необходимых специалистов, имеющих опыт работы в области цифрового моделирования, статистики и анализа данных.

Таблица 1

Классификация рисков внедрения цифрового двойника на сборочном производстве

Риски	Форма проявления	Последствия	Степень влияния
Организационный риск	Отсутствие специалистов и проблемы переквалификации персонала	Саботирование проекта, задержка проекта	Средняя
Технологические ограничения	Устаревшее оборудование и программное обеспечение	Поиск методов поэтапной реализации цифрового двойника, ограниченное внедрение	Средняя
Информационная блокада	Недостоверные данные, отсутствие интеграции с системами ПО	Получение недостоверной модели	Незначительная
Экономический эффект	Высокая стоимость внедрения	Закрытие проекта	Высокая

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Длительная работа предприятия, имеющего годы и десятилетия опыта работы, как правило, обладает статистическими данными, упрощающими верификацию модели, но обычно такие предприятия имеют при себе скрытые человеческие факторы, оказывающие негативное влияние на внедрение как цифровых двойников, так и новых технологий в целом. В данном ключе цифровизация и автоматизация влекут за собой сопротивление рабочего персонала к адаптации к новым интерфейсам работы, переквалификации и аттестации на новое оборудование и компетенции, что еще больше усиливает недостаток отсутствия специалистов, указанный выше.

2. Технологические ограничения. В первую очередь, имеет место разнородность технологических приспособлений, оборудования и программного обеспечения предприятия. Если говорить о крупном предприятии, которое желает осуществить локальную цифровизацию производства, данный фактор, вероятно, не станет критическим звеном на данном этапе, но для небольших «игроков» отсутствие служб, способных согласовать и поставить нужное программное обеспечение для имитационного моделирования, изготовить индивидуальные приспособления и оснастку для осуществления нестандартных технологических операций и оборудования, поддерживающего необходимые стандарты (к примеру OPC, IOT), может заставить отказаться от идеи еще на этапе поиска и анализа финансирования проекта.

Также на неавтоматизированном предприятии преимущественным методом ведения документооборота является бумажный способ, который приводит к отсутствию CAM/CAD/CAE форм хранения моделей изделий и сложностям в создании новых

моделей, а также цифровой адаптации технологических процессов.

3. Информационный риск (блокада). Данный риск вытекает из описанных выше рисков и включает в себя качество исходных данных при внедрении цифрового двойника, поскольку человеческий фактор влияет на бумажный документооборот, приводя во временной перспективе ко многим неточностям в исходных данных и ошибкам при их вводе в имитационную модель, а также к проблемам при интеграции этих данных в единую платформу на уровне системы ERP/MES/SCADA [5].

Применительно к ранее упомянутому производственному процессу сборочных рукаев широко используемый технологический процесс предполагает использование станков и оборудования, не имеющего возможностей архивирования и ведения регулярного статистического анализа (отрезные или опрессовочные станки). Усугубляющим фактором является отсутствие датчиков для сбора и анализа данных, интерфейсов и программного обеспечения или невозможность модернизации устаревшего оборудования, отсутствие физических аналогов для полноценного моделирования и симуляции процесса в реальном времени. Анализ внедрения цифрового двойника для сборочного участка может привести к необходимости частичной или полной необходимости переработки технологического процесса. Так как данный фактор влечет за собой замену оборудования и невозможность немедленного получения достоверной информации о его последующей работе, данная проблема может привести к недекватности модели.

При получении и вводе исходных данных в имитационную модель не всегда можно заранее проанализировать и вве-

сти необходимые данные для последующей верификации и валидации модели. Это затрудняет и растягивает время, необходимое для внедрения цифрового двойника, так как требует дополнительных мер по отладке и его внедрению.

4. К последнему и наиболее важному в условиях конкуренции на рынке в настоящее время относится экономический фактор. Цифровой двойник, несмотря на все свои преимущества, представляет собой долгосрочную модель планирования и получения прибыли, а также включает в себя необходимость прекращения производства на заданных участках для их переоборудования. Поэтому для небольших систем, не имеющих достаточных способов параллельного получения финансирования проектов, закупка необходимого оборудования, переобучение персонала, закупка лицензий на программное обеспечение и обоснование четкого экономического эффекта от внедрения системы цифрового двойника для управляемческого персонала предприятия ставят желание следовать тенденциям современных концепций цифровизации в положение нерентабельных и откладываемых на неопределенный срок.

Анализ рисков внедрения цифрового двойника приводит к поискам их минимизации с целью повышения их целесообразности для небольших предприятий, не обладающих всеобъемлющими ресурсами и готовностью к внедрению цифрового двойника. Приведенные факторы являются ограничениями, заставляющими вести поиск альтернативных подходов к созданию цифрового двойника, который не потребует полноценной и немедленной интеграции с физической системой и дорогостоящих финансовых вложений в закупку оборудования и лицензирование программного обеспечения на первоначальных этапах реализации цифрового двойника.

Для работы с описанными выше факторами классический подход к построению цифрового двойника от идеи до физически реализованного объекта нецелесообразен, поэтому логичным является предложить подходы к методологии построения цифрового двойника в условиях работы с ограниченным набором данных и пониженными требованиями к процессам его внедрения.

1. На первом этапе построения цифрового двойника первоочередным процессом является проведение инвентаризации оборудования с целью определения возможностей использования, адаптации технологического оборудования в предполагаемой модернизированной системе и анализ те-

кушего технологического процесса. Такой процесс включает в себя поиск источников данных, которые могут архивироваться как на бумажных носителях, так и в различных средах офисного программного обеспечения и являются историческими данными (отчеты, документация и журналы, хранящиеся в ПО Microsoft Word или Excel, статистические данные, полученные от прошлых производственных циклов). Такие данные, как правило, весьма ограничены и имеют определенные неточности, но в качестве основы для создания первоначальной модели таких данных, как правило, достаточно. Источники данных представлены в таблице 2.

Данный подход в основе своей предполагает применение методов статистического анализа для выявления закономерностей в реконструированном на основе имеющихся данных процессе. Так, сборочный участок может представлять собой зоны, где каждая операция содержит определенный перечень выполняемых операций или одну операцию, и для каждой имеется свое оборудование, оснастка, инструменты. К примеру, возвращаясь к участку производства рукавов, «отрезка рукава» представляет собой отрезной станок, время операции, приспособление контроля отрезанного полуфабриката.

2. Второй этап является подготовительным. Он представляет собой ручной ввод данных в электронные формы, разумным является установка недорогих датчиков (в зависимости от технологического процесса ими могут быть датчики давления, температуры, расхода, в сборочном процессе преимущественно датчики положений, так как характер выполняемых работ предполагает собой позиционирование истыковку деталей друг относительно друга). В случае невозможности установки физических сенсоров имеет место использование виртуальных сенсоров, созданных на основе математических моделей и экспертных знаний, работающих на основе доступных данных о производственных параметрах и данных о входных и выходных материалах, заготовках, полуфабрикатах, что предполагает моделирование с использованием доступных программ [6; 7] (CAD, CAE, CAM). Немедленной физической реализации также не требуют методы динамического моделирования для воспроизведения производственного процесса вплоть до организации и использования симуляторов работы оборудования [8; 9] (при помощи передаточных функций, дифференциальных уравнений).

Таблица 2

Источники данных для построения виртуального цифрового двойника

Источник данных	Тип данных	Описание	Условности
Исторические данные	Отчеты и статистические данные	Данные о производственном процессе, собранные в прошлом (отчеты о поломках, переналадках, время работы оборудования, отчеты о производительности участка)	Возможны неточности в отражении фактической и текущей ситуации
Ручные записи	Текстовые и табличные файлы	Операторские журналы, акты на брак, на отработку, внедрение, аттестацию, бумажные отчеты, журналы регистрации дефектов (в зависимости от принятых на производстве стандартов ведения производственного процесса)	Имеет место риск человеческого фактора
Виртуальные сенсоры	Математические модели	Создание датчиков на основе математического моделирования (расчет положения через геометрические параметры, температуры через модель термодинамики, расхода, к примеру, через уравнение Бернулли)	Требуется дополнительная настройка и валидация
Экспертные знания	Операционные параметры	Описание и нюансы работы оборудования и технологического процесса от рабочих, специалистов, инженеров, конструкторов	Полностью зависит от опыта и квалификации работы персонала
Фото-видео-данные	Изображения, видеофайлы	Камеры, системы компьютерного зрения	Требуют дополнительных вычислительных ресурсов, могут повлечь дополнительные финансовые издержки

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

3. Третий этап можно представить как моделирование и визуализацию модели. Данный этап предполагает построение имитационной модели в удобной среде имитационного моделирования (к ним можно отнести AnyLogic [10], Plant Simulation [11]), возможно использование диаграмм и шаблонов процессов, а также построение логики работы объекта модернизации на основе принципов «что, если...», «если... то...», основываясь на наблюдениях.

За моделированием следует визуализация процесса при помощи панелей оператора и анализ полученного процесса на наличие неэффективных операций, узких мест в работе оборудования, простоев. Первичальный этап моделирования позволяет принять решение о необходимости подключения в модель новых данных, и при повторительных результатах позволяет говорить об интеграции с системами MES/ERP.

4. Построение гибридной модели. Гибридная модель цифрового двойника способна комбинировать физическое моделирование с аналитикой и экспертными знаниями [12-14]. В такой модели возможно пренебречь полным сбором данных в ре-

альном времени, сводя данный недостаток посредством опыта операторов, рабочих, специалистов статистическими данными работы производственной системы и локальной настройки оборудования. В таком случае становится возможным пооперационное разбиение всего сборочного процесса, поиск узких мест на определенных этапах и восприятие таких элементов системы как ключевых. С такой точки зрения, остальные участки сборочной цепи можно воспринимать как черный ящик, где моделируемый объект является основным и воспринимается в отрыве от остальных ее элементов, предлагая при этом поэтапное внедрение цифрового двойника на каждом из ее этапов. Также возможна и ситуация, в которой определенные элементы системы не будут нуждаться в модернизации, что упростит оптимизацию всего процесса внедрения цифрового двойника [15].

Подход к гибридной модели представляет собой интеграцию экспертных систем для принятия решения при ограниченных данных, формирование, разработку и использование правил принятия решений для конкретного технологического процес-

са и симуляцию процессов с целью воссоздания процесса работы оборудования. Преимущества и недостатки, представленные в данном подходе к проектированию и внедрению цифрового двойника, представлены в таблице 3.

Опираясь на указанную ранее таблицу 1, а также изложенный подход к построению цифрового двойника с его преимуществами и недостатками, указанными в таблице 3, методы минимизации рисков можно описать в соответствующем ключе, разделив на организационные, технологические, информационные и экономические, как основополагающие риски, и представить их в виде таблицы 4.

Таким образом, формализация данных подходов позволяет структурировать поэтапность построения цифрового двойника следующим образом:

- 1) сбор исторических данных (анализ и сбор существующих источников информации);
- 2) моделирование производственного процесса (создание модели на основе данных, полученных на первом этапе);
- 3) виртуальная симуляция (добавление виртуальных сенсоров и их настройка в модели);

4) экспертная проверка (валидация на основе опыта соответствующих специалистов);

5) компьютерное зрение (анализ фото- и видеинформации);

6) интеграция с производственными системами.

Поэтапное структурирование построения цифрового двойника и методы минимизации рисков, описанные в таблице 4, позволяют дополнительно разделить эти методы по минимизации на технические и организационные способы:

- организационные: разработка дорожной карты цифровизации с поиском и подключением проектной команды и производственных специалистов. В данном случае дорожная карта должна описывать поэтапный процесс внедрения цифрового двойника от этапа НИОКР, проведения курсов повышения квалификации персонала, структурированного подхода к поэтапному внедрению цифрового двойника и разработки пилотного проекта с фиксированным бюджетом на каждом этапе, а также меры по повышению доверия к проекту, посредством ведения отчетности о проделанных работах и демонстрации результатов в целях повышения доверия к проекту;

Таблица 3

Преимущества и недостатки построения цифрового двойника с данным подходом

Преимущества	Недостатки
Снижение затрат за счет отсутствия необходимости в установке дорогих датчиков и немедленной модернизации оборудования	Низкая точность по причине использования ограниченных данных и возможных ошибок в моделировании
Гибкость в подходе к работе с устаревшим оборудованием для небольших предприятий	Зависимость от экспертных знаний, модель опирается на опыт и квалификацию работников
Быстрая адаптация за счет имеющихся данных	Нет возможности осуществлять физический контроль за реальными изменениями в процессе
Снижение затрат на тестирование и оптимизацию	Ограничены возможности симуляций из-за сложностей в воспроизведении всех реальных и незадокументированных ранее сценариев

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 4

Методы минимизации рисков

Риски	Метод минимизации	Предполагаемый эффект
Организационный риск	Обучение сотрудников и разбиение цели на множество подцелей	Повышение лояльности персонала, открытая и понятная видимость достигаемых целей
Технологические ограничения	Использование открытых API и модульных типов внедрения	Снижение операционных затрат
Информационная блокада	Использование методов стандартизации и верификации данных	Повышение точности модели
Экономический эффект	Поэтапная реализация и пилотные проекты	Уменьшение затрат и инвестиций на первоначальных этапах

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

- технические: использование универсальных открытых интерфейсов программного обеспечения на проектных этапах реализации проекта, что позволяет минимизировать финансовое давление на проект и получить предварительные данные о возможности его дальнейшего осуществления и рассмотрения принципа модульного цифрового двойника как эффективной меры при осуществлении гибридного моделирования. Он заключается в поиске наиболее трудоемких операций, их анализе и точечном внедрении. Таким образом, несмотря на растягивание проекта, это позволяет осуществлять совершенствование производственной системы с точки зрения философии Кайдзен и непрерывно совершенствовать систему на последующих этапах, опираясь на опыт предыдущих.

Заключение

Осуществленный анализ позволяет сделать выводы, что реализация цифрового двойника на небольших производственных сборочных участках, не обладающих высоким уровнем автоматизации и цифровой зрелости в целом, сопряжена с рядом существенных технологических и организационных рисков, которыми выступают низкая зрелость оборудования, недостаточные объемы данных и неподготовленная к модернизации инфраструктура. Данные факторы могут оказывать негативное влияние на практическую реализацию и точность цифровых моделей.

Предложенная методология и меры по снижению рисков при создании цифрового двойника в подобных условиях позволяют продемонстрировать подходы к формированию работоспособной цифровой модели на основе комбинирования описанных методов и преодолеть часть технологических барьеров для обеспечения постепенного роста качества производственных процессов, способствуя постепенному повышению цифровой зрелости предприятия, улучшению управляемости производственных операций и достижению экономического эффекта. Такой адаптивная стратегия подхода к внедрению цифрового двойника представляется наиболее рациональным способом цифровой трансформации небольших, технологически отстающих производственных систем.

Список литературы

- Андреанов А.М. Анализ технологий комплексной цифровизации высокотехнологичного промышленного производства в условиях парадигмы «Индустрия 4.0» // Научные труды Вольного экономического общества России. 2021. № 2. DOI: 10.38197/2072-2060-2021-228-2-298-317. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-tehnologiy-kompleksnoy-tsifrovizatsii-vysokotekhnologichnogo-promyshlennogo-proizvodstva-v-usloviyah-paradigmuy-industriya-4-0> (дата обращения: 26.11.2025).

technologiy-kompleksnoy-tsifrovizatsii-vysokotekhnologichnogo-promyshlennogo-proizvodstva-v-usloviyah-paradigmuy-industriya-4-0 (дата обращения: 26.11.2025).

2. Халиулин Р.А. Цифровые двойники как инструмент мониторинга производственных процессов в индустрии 4.0 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. с. 45-50. DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-2-45-50. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-dvoyniki-kak-instrument-monitoringa-proizvodstvennyh-prosessov-v-industrii-4-0/viewer> (дата обращения: 26.11.2025).

3. Жданов Д.А. Цифровизация отечественных производственных компаний: состояние и перспективы // Экономическая наука современной России. 2023. № 2 (101). С. 127-141. DOI: 10.33293/1609-1442-2023-2(101)-127-141. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-otechestvennyh-proizvodstvennyh-kompaniy-sostoyanie-i-perspektivy-viewer> (дата обращения: 26.11.2025).

4. Царев М.В., Андреев Ю.С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 7. С. 517-531. DOI: 10.17586/0021-2454-2021-64-7-517-531. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-dvoyniki-v-promyshlennosti-istoriya-razvitiya-klassifikatsiya-tehnologii-stsenarii-ispolzovaniya-viewer> (дата обращения: 26.11.2025).

5. Старожук Е.А., Яковleva M.B. 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. DOI: 10.18334/vinec.10.3.110621. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-osnovnyh-riskov-snizheniya-effektivnosti-deyatelnosti-promyshlennyh-predpriyatiy-pri-vnedrenii-tsifrovyh-dvoynikov-v-viewer> (дата обращения: 26.11.2025).

6. Оганесян О.В., Бурлаченко О.В., Абрамян С.Г. Информационные (цифровые) технологии в машиноведении // The Scientific Heritage. 2020. №57-1. DOI: 10.24412/9215-0365-2020-57-1-20-24. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnye-tsifrovye-tehnologii-v-mashinovedenii> (дата обращения: 26.11.2025).

7. Булавина Е.В., Павлов И.Н., Булавин Ф.В. Масштабирование практики использования CAD/CAE/CAM-систем на малых предприятиях // Известия вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68. № 6. С. 536-544. DOI: 10.17576/0021-3454-2 025-68-6-536-544. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/masshtabirovaniye-praktiki-ispolzovaniya-cad-cae-cam-sistem-na-malyh-predpriyatiyah-viewer> (дата обращения: 26.11.2025).

8. Коннова А.А., Зубченко Е.С. Виртуальные информационно-измерительные приборы // Успехи современного естествознания. 2011. № 7 с. 126-127. URL: <https://s.natural-sciences.ru/pdf/2011/7/166.pdf> (дата обращения: 26.11.2025).

9. Лоскутов И.А., Скворцова Д.А., Исакандарова В.Г. Динамическое нормирование с использованием метода агентного моделирования процесса сборки оборудования для атомных электростанций // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С.46-52. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-46-52. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskoe-normirovaniye-s-ispolzovaniem-metoda-agentnogo-modelirovaniya-protsessa-sborki-oborudovaniya-dlya-atomnyh-viewer> (дата обращения: 26.11.2025).

10. Салаев Р.А., Федоров А.А., Салаева А.В. Имитационное моделирование агрегатно-сборочного производства // Известия Самарского научного центра РАН. 2021. № 1 С. 60-65. DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-60-66. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovaniye-protsessov-agregatno-sborchnogo-proizvodstva-viewer> (дата обращения: 26.11.2025).

11. Ильин Р.А., Бусаров Е.И., Шурыгин А.Ю. Имитационное моделирование производственной системы с применением программного продукта tecnomatix Plant Simulation // Технические науки – от теории к практике. 2016. № 1 (49). URL:

- <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovaniye-proizvodstvennoy-sistemy-s-primeneniem-programmnogo-produkta-tecnomatix-plant-simulation> (дата обращения: 26.11.2025).
12. Кузьменко В.П., Соленый С.В. Разработка модели цифрового двойника для гибридной производственной линии по сборке светодиодных осветительных приборов // Известия вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65. № 10. С. 725-734. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-725-734. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-modeli-tsifrovogo-dvoynika-dlya-gibridnoy-proizvodstvennoy-linii-po-sborke-svetodiodnyh-osvetitelnyh-priborov/viewer> (дата обращения: 26.11.2025).
13. Босиков И.И. Разработка метода анализа и гибридного имитационного моделирования сложных технических систем переменной структуры // Известия КБНЦ РАН. 2022. № 1 (105). С. 25-40. DOI: 10.35330/1991-6339-2022-1-105-25-40. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-metoda-analiza-i-gibridnogo-imitatsionnogo-modelirovaniya-slozhnyh-tehnicheskikh-sistem-peremennoy-struktury> (дата обращения: 26.11.2025).
14. Борисов В.В., Авраменко Д.Ю. Нечеткое ситуационное управление сложными системами на основе их композиционного гибридного моделирования // Системы управления, связи и безопасности. 2021. №3. С. 207-237. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-3-207-237. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nechetkoe-situatsionnoe-upravlenie-slozhnymi-sistemami-na-osnove-ih-kompozitsionnogo-gibridnogo-modelirovaniya> (дата обращения: 26.11.2025).
15. Голодков Ю.Э., Ёлшин В.В., Ларионова Е.Ю., Лазарев М.С. Особенности внедрения автоматизации сборочных процессов в мелкосерийном производстве // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. Выпуск 12. С. 19-23 DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-23-24. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-vnedreniya-avtomatizatsii-sborochnyh-protsessov-v-melkoseriynom-proizvodstve/viewer> (дата обращения: 26.11.2025).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.