

Научная статья

Original article

УДК 330.342

doi: 10.55186/2413046X_2025_10_11_268

**ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ И
РОБОТОТЕХНИКЕ**
**DIGITAL TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING AND
ROBOTICS**



Шангина Елена Игоревна, д.п.н., к.т.н., профессор, зав. кафедрой инженерная графика, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, E-mail: eishangina@yandex.ru

Сиразутдинова Наталья Борисовна, старший преподаватель кафедры инженерная графика, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, E-mail: nsirazutdinova@mail.ru

Савина Татьяна Евгеньевна, старший преподаватель кафедры инженерная графика, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, E-mail: tesavina@list.ru

Shangina Elena Igorevna, Doctor of Pedagogics, PhD, Professor, Head of the Department of Engineering Graphics, Ural State Mining University, Ekaterinburg, E-mail: eishangina@yandex.ru

Sirazutdinova Natalia Borisovna, Senior Lecturer at the Department of Engineering Graphics, Ural State Mining University, Ekaterinburg, E-mail: nsirazutdinova@mail.ru

Savina Tatiana Evgenievna, Senior Lecturer at the Department of Engineering Graphics, Ural State Mining University, Ekaterinburg, E-mail: tesavina@list.ru

Аннотация. Данная статья представляет собой аналитический обзор современных цифровых технологий, которые влияют на машиностроительный инжиниринг и базирующийся на трансформации таких фундаментальных сфер деятельности как машиностроение и робототехника. Рассматривается интеграция искусственного интеллекта (ИИ), коллаборативных роботов (коботов), технологий цифровых двойников и Интернета Вещей (IoT) и Дополненная реальность (AR) в рамках концепций Индустрии 4.0/5.0. Особое внимание уделяется междисциплинарному применению, проблемам масштабируемости, совместимости и этическим аспектам. Статья предлагает стратегические направления для исследований, нацеленные на обеспечение устойчивого развития экономики для данной отрасли.

Abstract. This article provides an analytical review of modern digital technologies that are influencing the transformation of fundamental industries such as mechanical engineering and robotics. It explores the integration of artificial intelligence (AI), collaborative robots (cobots), digital twin technologies, the Internet of Things (IoT), and augmented reality (AR) within the context of Industry 4.0/5.0. The article focuses on interdisciplinary applications, scalability challenges, compatibility issues, and ethical considerations. It also suggests strategic research directions aimed at promoting sustainable industry development.

Ключевые слова: цифровые технологии, машиностроение, робототехника, искусственный интеллект, коллаборативные роботы, киберфизические системы, интеллектуальное производство

Keywords: digital technologies, mechanical engineering, robotics, artificial intelligence, collaborative robots, cyber-physical systems, and intelligent manufacturing

Современное машиностроение и робототехника переживают основательную трансформацию, движимую цифровизацией. Если ранее промышленные роботы были жестко запрограммированными системами для

узкоспециализированных задач, то сегодня они эволюционируют в адаптивные, интеллектуальные комплексы, способные к автономной работе и тесному взаимодействию с человеком. Эта революция обусловлена конвергенцией целого ряда цифровых технологий: искусственного интеллекта, машинного обучения, сенсорики и киберфизических систем (CPS).

Цифровизация в машиностроении и робототехнике – интеграция цифровых технологий в проектирование, производство и эксплуатацию изделий. Цифровизация – это глубокое преобразование, которое выходит далеко за рамки простой автоматизации. Оно предполагает создание единой цифровой среды, связывающей все этапы жизненного цикла изделия: от проектирования и технологической подготовки до производства, обслуживания и утилизации.

Ключевая цель такой трансформации заключается в создании «умных фабрик» (Smart Factories), где данные управляют процессами в реальном времени. В настоящее время, в эпоху четвёртой промышленной революции (Industrial 4.0), жизненный цикл изделия включает в себя не только разработку CAD/CAE/CAM модели, но и создание цифрового двойника (Digital Twin) – цифровая копия физического объекта или процесса, помогающая оптимизировать эффективность бизнеса. Концепция «цифрового двойника» является частью четвёртой промышленной революции и призвана помочь предприятиям быстрее обнаруживать физические проблемы, точнее предсказывать их результаты и производить более качественные продукты. Например, для создания цифрового двойника вначале собирают данные об изделии, т.е. получение информации с физического объекта через сеть датчиков Интернета вещей/Промышленного Интернета вещей (IoT/IIoT) для формирования "чувствительной" системы, обеспечивающей связь с реальным объектом. Далее создается цифровая модель – виртуальный прототип, созданный с использованием CAD

(автоматизированное проектирование) и CAE (инженерный анализ) данных, которая является "телом" двойника — точной цифровой копией формы и свойств объекта. Затем производится интеграция и аналитика на платформах для агрегации данных, машинное обучение (ML) и искусственный интеллект (AI) для прогнозирования, которые выступают в роли "мозга", анализирующего данные и генерирующего полезные идеи, знания. И, наконец, осуществление обратной связи и визуализации. Для этого используются пользовательские интерфейсы, 3D-визуализация, дополненная реальность (AR) для взаимодействия, которые обеспечивают "взаимодействие" человека с двойником для принятия решений.

Таким образом, можно кратко сформулировать формулу цифровизации в машиностроении и робототехнике: «От CAD-моделей → к цифровым двойникам → к автономным производственным системам».

Мировая статистика наглядно демонстрирует этот рост: ежегодные глобальные установки роботов превысили 500 000 единиц с 2020 года, а Китай, являясь драйвером рынка, обеспечил 51% всех установок в 2023 году. Рынок робототехники был оценен в 54,2 млрд долларов США в 2023 году и, по прогнозам, будет расти на 11,4% ежегодно до 2030 года. Это вызвано не только стремлением к эффективности, но и необходимостью решения глобальных проблем, таких как дефицит квалифицированной рабочей силы, растущая конкуренция и запросы на массовую кастомизацию продукции. Цель данной статьи — критически проанализировать ключевые технологические тренды, их применение в различных секторах экономики, а также выявить нерешенные проблемы и наметить перспективные направления для будущих исследований.

Рассмотрим ключевые цифровые технологии в машиностроении и робототехнике.

1. Искусственный интеллект (ИИ/AI) и машинное обучение (ML).

Искусственный интеллект и машинное обучение стали краеугольным камнем интеллектуализации производственных систем. Эти технологии позволяют роботам выходить за рамки заранее заданных алгоритмов и адаптироваться к изменчивой производственной среде.

Принятие решений и автономия: Методы обучения с подкреплением (Reinforcement Learning) используются для автономной оптимизации действий робота, что позволяет сократить количество ошибок на 30% и энергопотребление на 20%. ИИ-алгоритмы применяются для решения широкого круга производственных задач: от проектирования систем и планирования процессов до обеспечения качества, технического обслуживания и автоматизированной сборки.

Адаптивная робототехника: Машинное обучение наделяет роботов способностью к самообучению и непрерывному улучшению своих операций. Это особенно важно в задачах, требующих высокой точности и повторяемости, таких как контроль качества, где роботы с системами технического зрения способны обнаруживать дефекты на микроскопическом уровне, превосходя человеческие возможности.

2. Коллаборативные роботы (коботы). Коботы, предназначенные для безопасного совместного труда с человеком, демократизируют автоматизацию, делая ее доступной для малых и средних предприятий. Безопасность и эффективность: в отличие от традиционных промышленных роботов, работающих в огороженных зонах, коботы оснащены датчиками силы и ограничения, системами обнаружения столкновений и мгновенной остановки. Исследования показывают, что их внедрение на сборочных линиях позволяет сократить время операций на 30% и повысить качество на 15%.

Человеко-ориентированный дизайн: Современные исследования в области взаимодействия человека и робота (HRC) фокусируются не только на физической безопасности, но и на когнитивных аспектах, таких как

психологическая нагрузка, доверие и удовлетворенность оператора. Это соответствует принципам Индустрии 5.0, где во главу угла ставится благополучие человека.

3. Цифровые двойники и киберфизические системы.

С помощью цифровых двойников (виртуальные копии физических объектов/процессов/систем) моделируются, анализируются, прогнозируются и управляются их реальными аналогами в режиме реального времени. В связке с IoT они образуют основу для киберфизических производственных систем.

С помощью цифровых двойников реализуется проактивная оптимизация, т.е. цифровые двойники позволяют проводить симуляцию производственных процессов, виртуальные испытания и отладку, что значительно сокращает время вывода продукции на рынок и снижает затраты.

Кроме этого, цифровые двойники позволяют производить предиктивное обслуживание. Это означает, что данные с датчиков, установленных на оборудовании, передаются в его цифрового двойника, где алгоритмы ИИ анализируют их и прогнозируют потенциальные отказы. Это позволяет перейти от планового обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию, предотвращая дорогостоящие простои.

4. Аддитивные технологии и новые материалы.

Цифровые технологии трансформируют и производство самих роботов. Аддитивное производство (3D-печать) позволяет создавать сложные, легкие и функционально-оптимизированные компоненты, недоступные для традиционных методов. Металлическая 3D-печать позволяет производить детали со сложной геометрией с минимальными отходами материала, хотя пока уступает в точности ЧПУ-фрезерованию. Полимеры и композиты: Использование углеродных волокон, армированных полимеров, позволяет создавать конструкции с высоким отношением прочности к весу, что критически важно для дронов и шагающих роботов и др. Активно

исследуется интеграция непрерывного волокна с 3D-печатью для создания высокопрочных деталей.

5. Интернет вещей (IoT) и Промышленный Интернет вещей (IIoT). Основными элементами в машиностроении являются следующие. Во-первых, датчики и сенсорные системы, которые собирают информацию о вибрациях, температуре и состоянии узлов для постоянного мониторинга оборудования. Такие данные критичны для своевременного выявления неисправностей и предупреждения сбоев. Во-вторых, контроллеры и коммуникационные модули, которые обрабатывают данные с сенсоров и обеспечивают их передачу через коммуникационные интерфейсы, включая Wi-Fi, LTE и 5G, в облачные сервисы для дальнейшего анализа и управления. В-третьих, облачные платформы и аналитика. Облачные решения позволяют хранить и анализировать большие объёмы данных, применять алгоритмы машинного обучения для прогнозирования износа и оптимизации процессов производства.

6. Дополненная реальность (AR) – это технология, которая накладывает цифровые объекты на реальный мир в режиме реального времени. Пользователь продолжает видеть всё вокруг себя, но к этому «добавляются» виртуальные элементы: изображения, текст, подсказки, анимации. AR не заменяет реальность полностью, а лишь улучшает и расширяет её. Ключевые технологии AR в современной инженерии содержат следующие. Во-первых, Компьютерное зрение и 3D-сканирование, обеспечивающее распознавание объектов и среды, а 3D-сканирование создаёт точные модели, важные для визуализации и взаимодействия с прототипами. Во-вторых, датчики движения и позиционирования, которые используются для точного отслеживания положения пользователя и объектов, что позволяет интегрировать виртуальные элементы с реальным миром в режиме реального времени. В-третьих, AR-очки и проекционные системы – это устройства, такие как смарт-очки, предоставляют наложение информации без

отвлечения, а проекционные системы отображают данные непосредственно на компонентах машин и рабочих поверхностях. Преимущества интеграция AR с системами искусственного интеллекта: а) интеграция AR с системами искусственного интеллекта; б) технологии распознавания образов и прогнозирования с помощью AI в AR помогают своевременно выявлять дефекты и прогнозировать техническое состояние оборудования; в) совместное использование AR и AI значительно ускоряет процесс принятия решений и снижает вероятность ошибок при эксплуатации машин.

AR помогает визуализировать опасные участки производственного процесса, обеспечивая мгновенное предупреждение персонала и предотвращение несчастных случаев, а также интеграция AR-информации с системами безопасности снижает количество аварий на предприятиях за счёт своевременного информирования и корректировки поведения работников.

Цифровизация, ее рациональное внедрение, играет важную роль в развитие всей экономики, а также усовершенствовании технологий машиностроения, в частности. Рассмотрим прикладное междисциплинарное значение и преимущества внедрения цифровизации.

Цифровые технологии в робототехнике находят применение далеко за пределами традиционного автомобилестроения. Логистика и складское хозяйство: В логистике роботы трансформируют управление цепями поставок, автоматизируя погрузочно-разгрузочные работы и управление складскими запасами. Они способны осуществлять навигацию в динамичной среде, обрабатывать объекты различных размеров и работать вместе с людьми, повышая скорость операций и снижая количество ошибок. В сельском хозяйстве роботы используются для сбора урожая, сортировки и посадки, компенсируя нехватку рабочей силы. Они повышают точность операций, что ведет к увеличению урожайности и сокращению отходов. Ключевой задачей является разработка робустных навигационных систем для работы на сложном рельефе. Роботизированные системы в здравоохранении

повышают точность хирургических вмешательств и эффективность реабилитации, а также используются в фармацевтической упаковке.

Несмотря на оптимистичные прогнозы, широкому внедрению цифровых технологий препятствует ряд серьезных вызовов.

1. Высокие затраты и сложность интеграции. Первоначальные инвестиции, необходимость в специализированных инженерных кадрах и сложности интеграции с устаревшим оборудованием остаются основными барьерами, особенно для малого и среднего бизнеса в России.

2. Проблемы совместимости и интероперабельности. Отсутствие единых стандартизированных протоколов для взаимодействия систем разных производителей тормозит создание гибких многовидовых экосистем. Несмотря на существование таких фреймворков, как OPC UA, проблема остается острой.

3. Кибербезопасность. Растущая связанность оборудования и его интеграция в корпоративные информационные системы (например, ERP) расширяет поверхность для кибератак, что требует разработки комплексных систем защиты.

4. Социально-экономические и этические аспекты. Автоматизация вызывает закономерные опасения о сокращении рабочих мест. Для смягчения этих последствий необходимы программы переобучения и повышения квалификации, чтобы работники могли перейти к более сложным и творческим задачам, техническое обслуживание и оптимизация роботизированных систем. Также требуют решения вопросы этики, защиты данных и обеспечения справедливого доступа к технологиям.

Цифровые технологии коренным образом меняют ландшафт машиностроения и робототехники, превращая их в высокоадаптивные, интеллектуальные и междисциплинарные области. Однако, как показывает данный обзор, инновации зачастую опережают возможности их практической интеграции и осмысления социальных последствий.

В качестве стратегических направлений для будущих научных изысканий можно выделить следующие:

Разработка экономически эффективных и модульных решений: Создание стандартизированных, недорогих и легко масштабируемых платформ для малых и средних предприятий, которые позволят преодолеть разрыв в уровне автоматизации между крупными корпорациями и малым бизнесом.

Укрепление интероперабельности и стандартизации. Активная работа над созданием и внедрением единых отраслевых стандартов для обмена данными и совместной работы разнородных систем, включая облачные платформы и legacy-оборудование.

Фокус на человеко-ориентированном дизайне. Дальнейшие исследования должны быть направлены на улучшение эргономического взаимодействия, развитие доверия между человеком и роботом и минимизацию когнитивной нагрузки на оператора в соответствии с парадигмой Индустрии 5.0. Разработка комплексных этических и нормативных рамок: Необходимы междисциплинарные исследования, включающие технических специалистов, социологов и правоведов, для создания руководств и стандартов по ответственному использованию ИИ и робототехники, учитывающих вопросы кибербезопасности, приватности и влияния на рынок труда.

Таким образом, успешное развитие цифровых технологий в машиностроении и робототехнике будет зависеть не только от прорывов в области аппаратного и программного обеспечения, но и от способности научного и промышленного сообщества решать комплексные проблемы интеграции, стандартизации и социальной адаптации.

Список источников

1. Амелин С. В. Организация производства в машиностроении в условиях цифровой трансформации // Организатор производства. 2020 № 1 С. 17–23.

2. Афанасьев АА. Цифровая трансформация машиностроения России в контексте четвертой промышленной революции. Вопросы инновационной экономики. 2024; 14(1):221-240.
3. Борисов В. Н., Почукаева О. В. Отечественное машиностроение как фактор научно-технологического развития экономики РФ // МИР. (Модернизация. Инновации. Развитие). 2019. Т. 10, № 1. С. 12–25. DOI: 10.18184/2079-4665.2019.10.1.12–25.
4. Гурлев И.В. Цифровизация экономики России и проблемы роботизации // Вестник Евразийской науки, 2020 №4, <https://esj.today/PDF/08ECVN420.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
5. Кулагин, В., Сухаревски, А., Мефферт, Ю. Настольная книга по цифровизации бизнеса / В. Кулагин, А. Сухаревски, Ю. Мефферт. – М.: Интеллектуальная Литература, 2019. – 293 с.
6. Милютин, Н. В. Использование цифровых решений в машиностроительной отрасли: перспективы и вызовы / Н. В. Милютин. — Текст// Молодой ученый. — 2023. — № 51 (498). — С. 10-12.
7. Цифровизация промышленности: задачи, преимущества внедрения // Adeptik: [сайт]. URL: <https://doczilla.pro/ru/blog/cifrovizaciya-promyshlennosti-kak-ehkonomit-za-schet-informacionnyh-tekhnologij/> (дата обращения: 13.11.2025).
8. Цифровизация промышленности: как экономить за счет информационных технологий // Doczilla: [сайт]. URL: <https://adeptik.com/blog/cifrovizaciya-promyshlennosti/?ysclid=lp1388r9j662365148/> (дата обращения: 13.11.2025).
9. Шваб К. Четвертая промышленная революция. - М.: Эксмо, 2016.

References

1. Amelin S. V. Organizaciya proizvodstva v mashinostroenii v usloviyax cifrovoj transformacii // Organizator proizvodstva. 2020 № 1 S. 17–23.

2. Afanas`ev AA. Cifrovaya transformaciya mashinostroeniya Rossii v kontekste chetvertoj promy`shlennoj revolyucii. Voprosy` innovacionnoj e`konomiki. 2024; 14(1):221-240.
3. Borisov V. N., Pochukaeva O. V. Otechestvennoe mashinostroenie kak faktor nauchno-texnologicheskogo razvitiya e`konomiki RF // MIR. (Modernizaciya. Innovacii. Razvitie). 2019. T. 10, № 1. S. 12–25. DOI: 10.18184/2079-4665.2019.10.1.12–25.
4. Gurlev I.V. Cifrovizaciya e`konomiki Rossii i problemy` robotizacii // Vestnik Evrazijskoj nauki, 2020 №4, <https://esj.today/PDF/08ECVN420.pdf> (dostup svobodny`j). Zagl. s e`krana. Yaz. rus., angl.
5. Kulagin, V., Suxarevski, A., Meffert, Yu. Nastol`naya kniga po cifrovizacii biznesa / V. Kulagin, A. Suxarevski, Yu. Meffert. – M.: Intellektual`naya Literatura, 2019. – 293 s.
6. Milyutin, N. V. Ispol`zovanie cifrovyy`x reshenij v mashinostroitel`noj otrasli: perspektivy` i vy`zovy` / N. V. Milyutin. — Tekst// Molodoj ucheny`j. — 2023. — № 51 (498). — S. 10-12.
7. Cifrovizaciya promy`shlennosti: zadachi, preimushhestva vnedreniya // Adeptik: [sajt]. URL: <https://doczilla.pro/ru/blog/cifrovizaciya-promyshlennosti-kak-ehkonomit-za-schet-informacionnyh-tekhnologij/> (data obrashheniya: 13.11.2025).
8. Cifrovizaciya promy`shlennosti: kak e`konomit` za schet informacionny`x tehnologij // Doczilla: [sajt]. URL: <https://adeptik.com/blog/cifrovizaciya-promyshlennosti/?ysclid=lp1388r9j662365148/> (data obrashheniya: 13.11.2025).
9. Shvab K. Chetvertaya promy`shlennaya revolyuciya. - M.: E`ksmo, 2016.

© Шангина Е.И., Сиразутдинова Н.Б., Савина Т.Е., 2025. Московский экономический журнал, 2025, № 11.