

Онуфриев С.Ю.

директор департамента технического обслуживания оборудования автозавода ООО «Хавейл Мотор Мануфактуринг Рус», РФ

Прядкин В.И.

доктор техн. наук, профессор кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Писарева С.В.

кандидат. ф-м. наук, доцент Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова, РФ

Быстров И.Р.

студент 4 курса автомобильного факультета Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова, РФ

Onufriev S. Yu.

Director of the Department of Equipment Maintenance at the «Havale Motor Manufacturing Rus» Automobile Plant, Russian Federation

Pryadkin V.I.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

Pisareva S.V.

PhD, Associate Professor Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

Bystrov I.R.

4th year student of the Automobile Faculty of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

ЦИФРОВИЗАЦИЯ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ЗАВОДАХ: МИРОВОЙ И ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ

DIGITALIZATION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN AUTOMOBILE FACTORIES: GLOBAL AND DOMESTIC EXPERIENCE

Аннотация: В статье описываются ключевые направления развития техники в области автопроизводства: применение искусственного интеллекта, развитие технологии цифровых двойников, переход к модульному типу производства и постепенный отказ от конвейеров. Кроме того, в статье уделяется особое внимание замещению людей роботами, программами и ИИ для выполнения ответственных задач с большей точностью и меньшими затратами времени.

Abstract: The article describes the key areas of development in the field of automotive manufacturing, including the use of artificial intelligence, the development of digital twin technology, the transition to a modular production system, and the gradual elimination of conveyor belts. Additionally, the article focuses on the replacement of humans with robots, software, and AI to perform critical tasks with greater accuracy and efficiency.

Ключевые слова: автомобиль, стапель, сборочный конвейер, модульная сборка, умный завод, искусственный интеллект.

Keywords: automobile, frame, assembly line, modular assembly, smart factory, artificial intelligence.

Введение

История мирового автомобильного производства начинается в 80 годах XIX века, когда автомобили собирались в ручную с применением стапелей. Это трудоемкий и дорогой процесс, который требовал высокую квалификацию рабочих, поэтому автомобили в то время были большой роскошью (рис. 1).

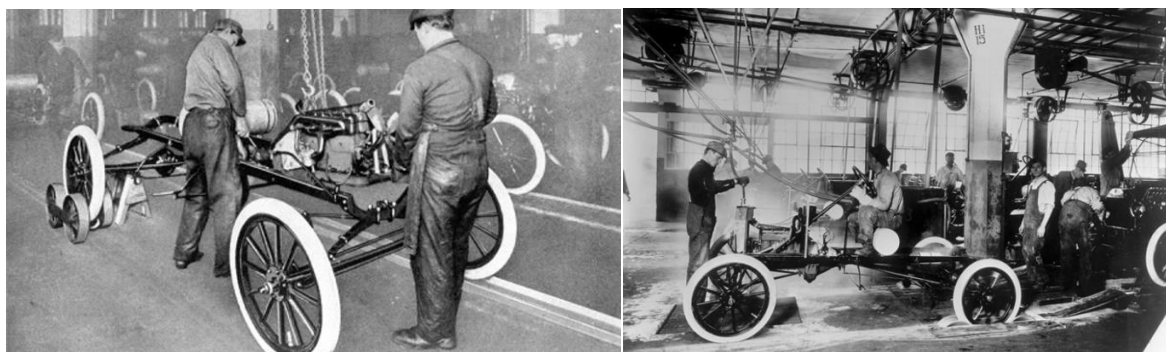


Рисунок 1 – Сборка автомобилей на стапеле

Ситуация изменилась с первым применением конвейерного метода сборки автомобилей Генри Фордом. Конвейерный метод предусматривал сборку автомобиля в жестком, последовательном порядке каждой технологической операции (рис. 2). Узкая специализация производства позволила привлекать для работы на сборочном конвейере низко квалифицированных рабочих, следовательно, платить им меньшую заработную плату. В отличие от предыдущего подхода, в котором рабочие перемещались между автомобилями с необходимой оснасткой и деталями, конвейерная линия самостоятельно перемещала автомобили, а рабочие только осуществляли сборочные операции. Это был прорыв, а идея использовать конвейерную линию для сборки автомобилей на долгие годы закрепилась у компаний, поскольку позволила сделать автомобиль массовым продуктом, гораздо более доступным для простых людей.

Однако на сборке все еще присутствовал ограничивающий фактор – человек. Риск человеческой ошибки заставил производителей задуматься о постепенном упразднении человеческого труда на трудоемких и монотонных операциях. Уже в 1970-х годах на автомобильных заводах крупных компаний стали появляться станки с автоматическим управлением и автоматизированные производственные линии с роботами – манипуляторами (рис. 3). Это повысило

точность при изготовлении и сократило время на выполнение производственных операций. В настоящее время роботы занимают львиную долю производственных территорий автомобильных заводов. Однако применение роботов не обеспечивает выполнение требований потребителей, предъявляемых к производителям автомобилей. Интенсивным внедрением в производство новых технологий и электроники, обусловлено то, что в одном и том же автомобиле потребителям нужна разная комплектация, начиная от двигателя с трансмиссией, заканчивая опциями комфорта и безопасности, при этом автомобили должны быть доступны покупателям.



Рисунок 2 – Сборка автомобилей марки Ford на конвейере

Решение данной проблемы потребовало от производителей принципиально нового решения, которое было найдено в большей цифровизации, использованию в производственных целях искусственного интеллекта и постепенном переходе к концепции «умного» автомобильного завода.

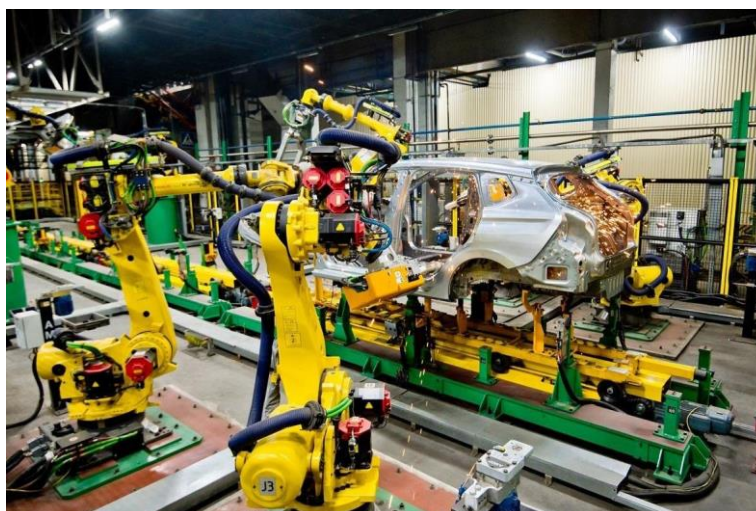


Рисунок 3 – Сварка кузова автомобиля роботами

Концепция «умного» автомобильного завода основана на принципиально новой технологии сборки, предусматривающей отказ от конвейера к гибкой сборочной модульной системе. Новая технология сборочного производства автомобилей предполагает отказ от сборочной линии, к модульной сборке. Благодаря модульной сборке производственные предприятия перестают быть статичными и превращаются в адаптивные среды.

Цель исследований – выполнить ретроспективный анализ технологий сборки автомобилей с конца XIX века по настоящее время и сделать прогноз на дальнейшее развитие технологий на основе цифровизации и искусственного интеллекта.

Материалы и методы

Проведен анализ литературных источников путем применения историко-аналитического метода. Объекты исследований – литературные источники по современным достижениям технического прогресса в области технологий сборочного производства автомобилей нового поколения.

Результаты и обсуждения

В настоящее время идет активная адаптация информационных технологий в автомобильное производство. Широкое внедрение цифровизации обеспечивает снижение себестоимости, а также повышение качества выпускаемой автомобильным заводом продукции, безопасности и сводит к минимуму риск человеческой ошибки. В условиях все большего количества функций в современных автомобилях растет требование к точности изготовления деталей и электронных компонентов, поэтому внедрение информационных технологий, а также использование в производстве искусственного интеллекта обеспечивает выполнение этих требований. Намечился переход к так называемой «индустрии 4.0» или «четвертой промышленной революцией». Эта концепция предполагает полную цифровизацию и интеллектуализацию промышленности, где все физические объекты объединяются в единую сеть с виртуальными системами, способными взаимодействовать друг с другом и принимать какие-либо решения.

Внедрение «умных» заводов подразумевает высокооцифрованное производственное предприятие, которое использует взаимосвязанные системы, технологии и данные для улучшения производственных процессов и обеспечения лучшего принятия решений, а также большей гибкости для производства различных продуктов. Новые производственные технологии формируют «стро-

ительные блоки» умных заводов, которые позволяют автопроизводителям быстрее и экономически эффективнее внедрять новые модели, при этом значительно сокращая потребление энергии и затраты, и достигая целей устойчивого развития».

Умный автомобильный завод представляет собой комплекс систем, в числе которых: интернет вещей, искусственного интеллекта, машинное обучение, цифровые двойники, робототехника, аддитивные технологии и технологии дополненной или виртуальной реальности, направленные на оптимизацию рабочих процессов, снижение затрат, уменьшение конечной себестоимости продукта при более качественном его создании. Умные заводы становятся ключевой особенностью индустрии 4.0. Они обладают контекстным восприятием и помогают людям и машинам выполнять свои задачи [1].

Компания Audi в 2016 году впервые внедрила высокогибкую сборочную систему на основе использования AGV (автоматизированные управляемые транспортные средства) и дронов (рис. 4). В отличие от привычных сборочных систем с фиксированными компоновками и проектами процессов (рис. 5). Умный завод Audi позволяет осуществлять высокогибкое проектирование процессов и последовательность производственных заказов для достижения максимальной степени индивидуализации продукта [2, 3].



Рисунок 4 – Автоматизированное управляемое транспортное средство

Автоматизированные управляемые транспортные средства на заводе применяются двух видов: одни перевозят машины между модулями, другие — поставляют необходимые запчасти и навесное оборудование к ним же. Логистика и транспортировка деталей полностью выполняются системой беспилотного вождения. Автономное движение обеспечивается специальными лазерными датчиками, установленными по всей территории завода. Если перед AGV

возникает препятствие, она останавливается и сообщает об этом оператору. Скорость движения тележки в настоящее время ограничена на 4 км/ч.

На умном заводе миниатюрные и легкие роботы заменяют ручной труд для установки и крепления мелких деталей. Гибкие сборочные тележки заменяют ручную затяжку винтов. На сборочной тележке размещено множество механических рук. Эти механические руки могут идентифицировать и закручивать винты в соответствии с установленными процедурами. Система помощи при сборке может информировать рабочих, где производить сборку, и может проверять конечный результат сборки. Однако некоторые операции все еще требуют человеческого участия, например, сборка жгутов электропроводки. Впрочем, система помощи при сборке может подсказывать рабочим, какие этапы требуют участие человека и отображать на экране результат контроля качества, предотвращая выпуск брака [3].



- 1 – RFID обеспечивает передачу данных об автомобилях всему заводу; 2 – Pearlchain синхронизирует производственную логистику; 3 – Напольные конвейеры без привода; 4 – система беспилотного транспорта; 5 – умное сканирование кузова; 6 – умное обслуживание; 7 – планирование виртуальной сборки; 8 – планирование виртуального хранилища; 9 – 3D-печать; 10 – кокпит покрасочного цеха; 11 – Audi Stream виртуальная экскурсия по заводу; 12 – беспилотник для определения положения ТС

Рисунок 5 – Устройство «умного» автомобильного завода на примере завода Audi

В отличие от традиционных сборочных систем с фиксированными процессами, умный завод позволяет осуществлять гибкое проектирование процес-

сов и последовательностей производственных заказов для достижения наивысшей степени индивидуализации продукта при сохранении производственной эффективности. Автономные мобильные роботы дают возможность разрабатывать принципиально новые формы сборки за счет гибкого перераспределения производственных услуг, необходимых для производства продукта

Дальнейшее развитие цифровизации привело к внедрению в сборочное производство интернет вещей – направления развития сети физических объектов, оснащенных встроенными технологиями для взаимодействия друг с другом и внешней средой. Все компоненты на производстве становятся «умными» и связываются в единую сеть. Это фундаментальная концепция современных «умных» заводов. Система интернета вещей является базовой основой бережливого производства, дополняя и усиливая его воздействие в создании конкурентных преимуществ для производственных компаний.

Система интернета вещей так же позволяет осуществлять отслеживание производства в режиме реального времени. Датчики, прикрепленные к производственному оборудованию, активам и материалам, могут длительное время отслеживать заданные параметры. Данные с них передаются по проводным и беспроводным сетям на платформы, которые их анализируют. Появляется возможность отслеживать в реальном времени проблемы или сбои и принимать своевременные решения [4].

Цифровизация производства и управление производством невозможно, без использования искусственного интеллекта, который преобразует каждый этап производственного процесса на автомобильном заводе – от проектирования до контроля качества вышедшего с конвейера автомобиля. Все чаще для таких задач, как сварка, покраска, сборка используются роботы (рис. 6). Это повышает эффективность работы завода и снижает риск человеческой ошибки. Развитие в этом направлении дает возможность создания «умного» завода, где роботы и люди будут беспрепятственно сотрудничать для оптимизации производства. Все больше операций, где требуется участие человека, сокращается. Сварка, сборка, окраска, контроль качества – уже не требуют человеческого вмешательства, так как искусственный интеллект и роботы справляются точнее, быстрее, а риск человеческой ошибки будет сведен к минимуму [5].

Сборка автомобиля на автоматизированных управляемых транспортных средства производится благодаря наличию цифрового двойника (рис. 7). Цифровой двойник на базе виртуальной модели автомобиля, позволяет моделировать поведение этого объекта или протекание процесса при любых условиях.

Концепция цифрового двойника позволяет пользователю создать систему, которая будет давать информацию о том, как различные изменения будут влиять на реальный объект. Цифровой двойник так же нацелен на объединение технологий глубокого обучения с данными, полученными из реального опыта, для создания алгоритмов, которые будут изменять поведение цифровой двойник. В основе этой технологии лежит информация от сенсорных устройств, CAD-модели и инженерные дисциплины вместе с реальными данными, проанализированными с помощью сложных моделей глубокого обучения [6].



Рисунок 6 – Роботизированная сборка автомобиля на конвейере

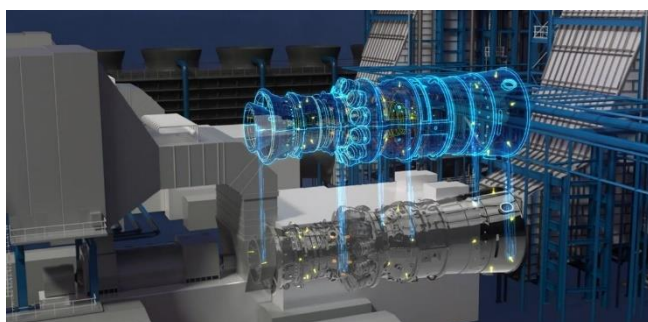


Рисунок 7 – Цифровой двойник

После создания цифрового двойника информация о среде, в которой он существует, информация собирается с помощью чувствительных сенсоров. Далее с помощью алгоритмов эти данные анализируются для оценки различных параметров среды цифрового двойника. Цифровой двойник, по своей сути, является виртуальным спутником автомобиля или производственного процесса.

Это дает руководителям производства возможность осуществлять мониторинг и управление в реальном времени. Мощное вычислительное устройство осуществляет постоянную передачу данных, подвергающихся в последствии анализу. Этот подход позволяет прогнозировать потенциальные сбои и устранять их заранее, а операции настраивать более точно для повышения эффективности. Сложность цифровых двойников растет, их становится больше ввиду удешевления данных. Они уже превратились в жизненно важный элемент арсенала руководителя высокотехнологичного производства [6, 7].

Компания BMW заключила партнерство с NVIDIA и создала цифровой двойник целого завода по производству электромобилей (рис. 8). Она первая реализовала эту концепцию для оптимизации производства и управления [8, 9].

Цифровой двойник и искусственный интеллект, являющихся фундаментом, и все большем их включении в жизни предприятий, с их внедрением открывается новая тенденция в производстве – индустрия 4.0. Это новая цифровая эра в мире автомобильного производства. В цифровую эпоху, чем больше компонентов объединяется, тем информативнее становится результат их анализа. Это дает производителю огромное количество вариантов решения той или иной производственной задачи на любом этапе производства [10].



Рисунок 8 – Цифровой двойник завода по производству электрических автомобилей BMW

В КНР состоялся запуск крупнейшего завода Changan, Huawei и China Unicom, который уже прозвали «цифровым интеллектуальным заводом». Технологичность завода позволяет одновременно производить автомобили разных брендов, а также для конкретного покупателя. Кроме того, завод обладает спо-

способностью к «самообучению» благодаря активному применению искусственного интеллекта. На заводе сейчас трудятся 1400 промышленных роботов, задействовано свыше 200 автоматизированных рабочих станций и активно применяются 650 автономных транспортных тележек (AVG) [11].

Контроль качества на ведущих автомобильных заводах осуществляется интегрированной системой технологий, работающих в режиме реального времени на всех этапах производства. Среди них: цифровые двойники, компьютерное зрение, контроль роботами, системы отслеживания, автоматизированные испытания и интеграция с облачными платформами (рис. 9). Компания Pegatron внедрила в производство технологию NVIDIA Metropolis для автоматического оптического контроля (AOI) качества электронных компонентов. Это повысило показатель точности при проверке качества до 99,8% [5].



Рисунок 9 – Применение компьютерного зрения для определения качества покраски в световом тоннеле

Mercedes – Benz используя на основании приложений, построенных Omniverse, платформу Metropolis которая может обогащать данные из них для решения конкретных задач, применяя компьютерное зрение: контроль качества сварных швов и геометрии кузова, контроль правильности сборки узлов, контроль окраски [12].

Компания Ford внедрила две собственные технологии и искусственного интеллекта: AiTrizi MAIVIS для обнаружения дефектов в режиме реального времени. AiTriz, использует машинное обучение и видеопоток, чтобы находить миллиметровые перекосы и смещения. MAIVS, работает со снимками, которые делают смартфоны, закреплённые на 3D печатных стойках, и проверяет, все ли детали установлены в соответствии с нормой (рис.10) [13].

Автоматизация и роботизация на умных заводах предполагает не только сборку автомобилей, но и производство деталей к ним. В отличие от традиционной обработки, в основе которой предусмотрены такие технологические операции, как вытачивание, фрезеровка или литье деталей.



Рисунок 10 – Применение компьютерного зрения компанией Ford для определения дефектов

Технология 3D-печать осуществляет наложение материала слой за слоем, создавая деталь. Благодаря послойному построению требуемая деталь может быть любой формы, когда раньше форма деталей ограничивалась целесообразностью экономических вложений (рис. 11).

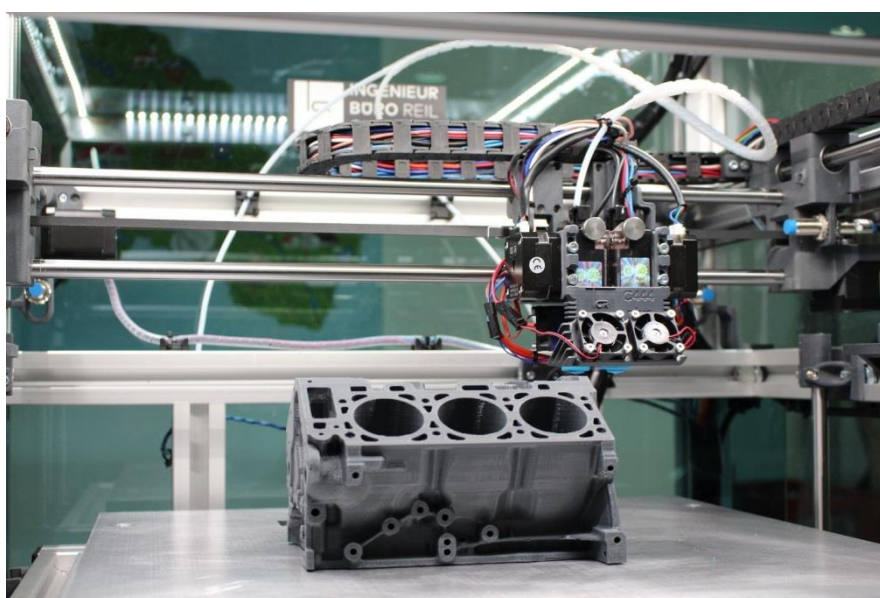


Рисунок 11 – Применение аддитивных технологий для изготовления блока цилиндров двигателя

Печатные алюминиевые детали имеют примерно в два раза больший предел прочности на разрыв эквивалентных частей, и к тому же они на 20–30% легче деталей, изготовленных из конструкционного литья.

Существует несколько основных технологий: лазерная печать, печать с использованием пучка электронов, струйная печать связующим и послойное наплавление [14].

Готовые детали представляют собой объекты, имеющие шероховатую, в частых случаях зернистую. Поверхность в последствии их необходимо обрабатывать механическим путем или станком с ЧПУ. Кроме того, детали все так же должны проходить термообработку.

В настоящее время цифровизация сборочного производства автомобилей выходит на новый качественный уровень, а связь между машинами и производственными объектами, становятся все более интеллектуальными, возвещают о новой эре: четвертой промышленной революции, Индустрии 4.0.

Выводы

1. Проведенный ретроспективный анализ эволюции технологий сборочного производства автомобилей показал, что на первом этапе использовали стапельную сборку, далее была внедрена конвейерная сборка, а ей на смену пришла модульная сборка.

2. Дальнейшее развитие технологий сборочного производства автомобилей связано с внедрением технологий искусственного интеллекта, цифровых двойников, робототехника, аддитивные технологии и технологии дополненной или виртуальной реальности, базирующимся на модульной сборке.

Список литературы

1. Р. Карим. ИИ-завод / Р. Карим, Д. Галар, У. Кумар // CRCPress. – 2023. – 444 с. // ЭБС «Googlebooks» - URL: https://www.google.ru/books/edition/AI_Factory/dYm3EAAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0 (дата обращения: 14.11.2025)
2. Г. Ульрик. Беспилотные транспортные системы / Г. Ульрик, Т. Альбрехт // SpringerFachmedienWiesbaden. – 2022. – 271 с. // ЭБС «Googlebooks». - URL: https://www.google.ru/books/edition/Automated_Guided_Vehicle_Systems/i4qbEAAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0 (дата обращения: 14.11.2025)
3. Е. Кузьмин. Цифровая трансформация в индустрии / Е. Кузьмин, Д. Ленг, В. Акбердина, В. Кумар // SpringerInternationalPublishing. – 2022. – 492 с. // ЭБС «Googlebooks». - URL: https://www.google.ru/books/edition/Digital_Transformation_in_Industry/DWBsEAAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0
4. А. Дешпанд. Передовая производственная цепочка и система поставок с использованием Интернета вещей / А. Дешпанд, Б. Саркар, Д. Дейв, Р. Дав // WalterdeGruyterGmbH. – 2024. – 338 с. // ЭБС «Googlebooks» - URL:

https://www.google.ru/books/edition/Advanced_Manufacturing_and_Supply_Chain/bjX2EAAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0 (дата обращения: 14.11.2025)

5. Б. Саркар. Искусственный интеллект для передового производства и промышленного применения / Б. Саркар, Р. Кумар Пол // SpringerNatureSwitzerland. – 2025. – 174 с. // ЭБС «Googlebooks» - URL: https://www.google.ru/books/edition/AI_for_Advanced_Manufacturing_and_Indust/fr1TEQAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0 (дата обращения: 14.11.2025)

6. А. Кашиф Башир. Цифровой двойник для умного производства / А. Кашиф Башир, Б. Балусеми, П. Малик, Р. Вани, Р. Кумар Дханарай//ElsevierScience. – 2023. – 350 с. // ЭБС «Googlebooks» - URL: https://www.google.ru/books/edition/Digital_Twin_for_Smart_Manufacturing/xC2gEAAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0 (дата обращения: 14.11.2025)

7. А. Локеш Гади. Развитие устойчивого автомобильного производства с помощью интеллектуального технического обслуживания на основе искусственного интеллекта, цифровых двойников и интеллектуальных хранилищ данных / А. Локеш Гади // GLOBALPENPRESSUK. – 2025. – 263 с. // ЭБС «Googlebooks» - URL: https://www.google.ru/books/edition/Advancing_Sustainable_Automotive_Manufac/KBFTEQAAQBAJ?hl=ru&gbpv=1 (дата обращения: 14.11.2025)

8. A. Tarantino. Умное производство / A. Tarantino // Wiley – 2022. – 464 с. // ЭБС «Googlebooks» - URL: https://www.google.ru/books/edition/Smart_Manufacturing/hGZxEAAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0 (дата обращения: 14.11.2025)

9. Russian Busibes – Новая фабрика BMW не существует в реальной жизни, но все равно меняет автопром. – URL: <https://rb.ru/stories/bmw-factory-twin> (дата обращения: 14.11.2025)

10. Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance / A. Tubis, A. Burduk, E. Chlebus, T. Nowakowski // Springer International Publishing – 2018. – 785с. // ЭБС «Googlebooks» - URL: https://www.google.ru/books/edition/Intelligent_Systems_in_Production_Engine/afpmDwAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0

11. Mail.ru – Changan и Huawei открыли самообучающийся автомобильный завод. – URL: <https://auto.mail.ru/article/97838-changan-i-huawei-otkryili-samoobuchayuschij-sya-avtomobilnyj-zavod> (дата обращения: 14.11.2025)

12. Mercedes-Benz: «Digital First» production. – URL: <https://group.mercedes-benz.com/search/?query=NVIDIA+&category=all> (дата обращения: 14.11.2025)

13. ИИ-камеры на заводах Ford ловят дефекты, которые сложно заметить. – URL: <https://habr.com/ru/companies/bothub/news/936540> (дата обращения: 14.11.2025)

14. М. Васим 3D Printing and Additive Manufacturing: Technologies, Applications, and Future Directions[Текст]/ Wasim M., K. Helal //Deep Science Publishing. – 2025. – 136с. – URL: https://www.google.ru/books/edition/3D_Printing_and_Additive_Manufacturing_T/Ig-HEQAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0 (дата обращения: 14.11.2025)

References

1. R. Karim AI Factory / R. Karim, D. Galar, U. Kumar // CRCPress. - 2023. - 444 p. // Googlebooks Electronic Library System - URL: https://www.google.ru/books/edition/AI_Factory/dYm3EAAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0 (accessed: 11/14/2025)

2. G. Ulrich Unmanned Transport Systems / G. Ulrich, T. Albrecht // SpringerFachmedienWiesbaden. - 2022. - 271 p. // Googlebooks Electronic Library System - URL: https://www.google.ru/books/edition/Automated_Guided_Vehicle_Systems/i4qbEAAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0 (Accessed: 11/14/2025)

3. E. Kuzmin Digital Transformation in Industry /E. Kuzmin, D. Leng, V. Akberdina, V. Kumar //SpringerInternationalPublishing. - 2022. - 492 p. // Googlebooks Electronic Library System - URL:

https://www.google.ru/books/edition/Digital_Transformation_in_Industry/DWBsEAAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0

4. A. Deshpande Advanced Manufacturing Chain and Supply System Using the Internet of Things / A. Deshpande, B. Sarkar, D. Dave, R. Dove // WalterdeGruyterGmbH. - 2024. - 338 p. // Googlebooks Electronic Library System - URL:

https://www.google.ru/books/edition/Advanced_Manufacturing_and_Supply_Chain/bjX2EAAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0 (accessed: 14.11.2025)

5. B. Sarkar Artificial Intelligence for Advanced Manufacturing and Industrial Applications / B. Sarkar, R. Kumar Paul // SpringerNatureSwitzerland. - 2025. - 174 p. // Googlebooks Electronic Library System - URL:

https://www.google.ru/books/edition/AI_for_Advanced_Manufacturing_and_Indust/fR1TEQAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0 (Accessed: 11/14/2025)

6. A. Kashif Bashir Digital Twin for Smart Manufacturing / A. Kashif Bashir, B. Balusemi, P. Malik, R. Wani, R. Kumar Dhanaraj // ElsevierScience. - 2023. - 350 p. // Googlebooks Electronic Library System - URL:

https://www.google.ru/books/edition/Digital_Twin_for_Smart_Manufacturing/xC2gEAAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0 (Accessed: 11/14/2025)

7. A. Lokesh Gadi Developing Sustainable Automotive Manufacturing with the Help of Intelligent Maintenance Based on Artificial Intelligence, Digital Twins, and Intelligent Data Warehousing / A. Lokesh Gadi // GLOBALPENPRESSUK. - 2025. - 263 p. // Googlebooks Electronic Library System - URL:

https://www.google.ru/books/edition/Advancing_Sustainable_Automotive_Manufac/KBFT EQAAQBAJ?hl=ru&gbpv=1 (Accessed: 11/14/2025)

8. A. Tarantino Smart Manufacturing / A. Tarantino // Wiley - 2022. - 464 p. // Googlebooks Electronic Library System - URL: https://www.google.ru/books/edition/Smart_Manufacturing/hGZxEAAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0 (Accessed: 11/14/2025)

9. Russian Busibes – The new BMW factory doesn't exist in real life, but it's still changing the auto industry. – URL: <https://rb.ru/stories/bmw-factory-twin> (date accessed: 14.11.2025)

10. Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance / A. Tubis, A. Burduk, E. Chlebus, T. Nowakowski // Springer International Publishing – 2018. – 785 p. // Googlebooks Electronic Library System - URL: https://www.google.ru/books/edition/Intelligent_Systems_in_Production_Engine/afpmDwAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0

11. Mail.ru - Changan and Huawei opened a self-learning automobile plant. –URL: <https://auto.mail.ru/article/97838-changan-i-huawei-otkryili-samoobuchayuschisya-avtomobilnyj-zavod> (accessed: 14.11.2025)

12. Mercedes-Benz: “Digital First” production. – URL: <https://group.mercedes-benz.com/search/?query=NVIDIA+&category=all> (Accessed: 14/11/2025)

13. AI cameras at Ford plants catch defects that are difficult to notice. – URL: <https://habr.com/ru/companies/bothub/news/936540> (Accessed: 14/11/2025)

14. M. Wasim 3D Printing and Additive Manufacturing: Technologies, Applications, and Future Directions / Wasim M., K. Helal // Deep Science Publishing. – 2025. – 136 p. – URL: https://www.google.ru/books/edition/3D_Printing_and_Additive_Manufacturing_T/Ig-HEQAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0 (date accessed: 14/11/2025).