

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ И РОБОТОТЕХНИКИ

Чжан Чэнь

Балтийский государственный технический  
университет «Военмех»  
zhangchen2120@outlook.com

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF INDUSTRIAL PROCESSES USING AUTOMATION AND ROBOTICS

Zhang Chen

*Summary.* Automation and robotics have revolutionized industrial processes, making them more efficient, accurate and flexible. The integration of automation and robotics into production has become a key factor in the development of modern industry. The ability to improve quality, reduce staff errors and increase production speed has made these concepts indispensable for various industries. Moreover, automation and robotics are becoming especially relevant in the era of Industry 4.0, where smart manufacturing and electronics play a crucial role. With the involvement of a large number of domestic and foreign publications, the current state of automation and robotics, their application, current limitations and future prospects in the context of improving industrial processes in order to increase efficiency are considered. To highlight the research topic from a practical point of view, the concept of a digital double is presented. Further, using a real example of an existing industrial welding problem, the solution of a specific task of increasing the efficiency of a real industrial process is considered and appropriate estimates are given.

*Keywords:* automation, robotization, industrial processes, efficiency.

*Аннотация.* Автоматизация и робототехника совершили революционный переворот в промышленных процессах, сделав их более эффективными, точными и гибкими. Интеграция автоматизации и робототехники в производство стала ключевым фактором развития современной промышленности. Возможность повысить качество, уменьшить количество ошибок персонала и увеличить скорость производства сделала эти концепции незаменимыми для различных отраслей промышленности. Более того, автоматизация и робототехника становятся особенно актуальными в эпоху Индустрии 4.0, где «умное» производство и мехатроника играют решающую роль. С привлечением большого числа отечественных и зарубежных публикаций рассматривается современное состояние автоматизации и робототехники, их применение, текущие ограничения и будущие перспективы в контексте совершенствования промышленных процессов с целью повышения эффективности. Для освещения темы исследования с практической точки зрения представлена концепция цифрового двойника. Далее на реальном примере существующей задачи промышленной сварки рассмотрено решение конкретной задачи повышения эффективности реального промышленного процесса и даны соответствующие оценки.

*Ключевые слова:* автоматизация, роботизация, промышленные процессы, эффективность.

Автоматизация подразумевает использование различных систем управления, датчиков и исполнительных механизмов для управления промышленным оборудованием, при этом необходимость вмешательства человека значительно снижается. Автоматизация может быть простой, например, термостат, регулирующий температуру в помещении, или сложной, такой как полностью автоматизированная сборочная линия. Основная цель автоматизации — повышение эффективности и производительности при минимизации человеческих ошибок. Этот подход нашел свое место в различных отраслях промышленности, причем автомобильный сектор стал основным катализатором развития систем автоматизации, вызванного стремлением к гибкости и повышению производительности производства.

Можно выделить несколько ключевых факторов, составляющих предприятия проводить автоматизацию

процессов: повышение производительности, снижение производственных затрат, улучшение качества изготовления деталей, сокращение сроков поставки, выполнение задач, нецелесообразных для ручного труда, предотвращение расходов, не связанных с автоматизацией, а также сокращение или устранение ручных операций [1]. Кроме того, автоматизация позволяет операторам линии перейти более к управлению, освобождая их от монотонной, повторяющейся и трудоемкой работы, и одновременно обеспечивает конкурентоспособность компании. Одним из наиболее значительных достижений в области автоматизации является внедрение принципов четвертой промышленной революции Индустрия 4.0, которая характеризуется интеграцией цифровых технологий в промышленные процессы [2, 3]. Эта концепция включает в себя использование Интернета вещей (IoT), искусственного интеллекта (AI) и аналитики больших данных. В Индустрии 4.0 машины общаются и принимают решения самостоятельно, что

приводит к созданию так называемой «умной фабрики» [4]. Этот принцип приводит к повышению эффективности и производительности и сокращению времени простоя за счет применения предиктивного обслуживания, основанного на аналитике данных, машинном обучении и IoT [5]. Автоматизация и Индустрия 4.0 позволили повысить эффективность производства, ускорить принятие решений и улучшить распределение ресурсов. Благодаря анализу и оптимизации данных в режиме реального времени компании могут минимизировать отходы, снизить энергопотребление и повысить качество своей продукции [6].

Робототехника выходит шире за рамки автоматизации, предоставляя физические машины, которые могут выполнять задачи с высокой степенью автономности. Эти машины оснащены системами датчиков и приводов, которые позволяют им взаимодействовать с окружающей средой [7]. Робототехника играет важную роль в гибком производстве, особенно когда задачи требуют точности и адаптивности [8]. Робототехника становится все более распространенной в различных отраслях промышленности [9].

Существуют различные определения роботов, но стандарт ISO 8373 и ГОСТ Р 60.0.0.4-2019 [10] четко характеризуют робота как управляемый перепрограммируемый и многофункциональный манипулятор с одной или несколькими степенями свободы, способный манипулировать объектами с помощью запрограммированных движений для выполнения различных функций. Промышленные роботы обычно состоят из трех ключевых компонентов: манипулятора (робота), контроллера (блок управления) и пользовательского интерфейса (консоли программирования). Робот оснащен датчиками и актуаторами, которые являются органами чувств и мышцами роботизированных систем. Датчики предоставляют данные об окружении робота, включая информацию о температуре, влажности, освещенности и детализации объектов [11]. Актуаторы отвечают за преобразование цифровых инструкций в физические движения. Достижения в области сенсорных технологий, такие как датчики обнаружения света и дальности (LiDAR), камеры и ультразвуковые датчики улучшили способность роботов ориентироваться и взаимодействовать с окружающей средой [12]. Усовершенствование исполнительных механизмов, таких как современные серводвигатели, позволяет роботам выполнять задачи с большей точностью и маневренностью [13].

Интеграция технологий датчиков и приводов оказала глубокое влияние на развитие робототехники. Роботы способны выполнять такие сложные задачи, как сборка и перемещение, монтаж и даже сложные хирургические операции [14]. Они могут работать вместе с людьми в условиях совместной деятельности, что особенно полезно

в производственных условиях [15]. В настоящее время промышленные роботы играют ключевую роль на производственных линиях автомобильной промышленности, причем в последние годы их применение в этой отрасли получило значительное развитие. Сдвиг в сторону роботизации облегчает сборку различных автомобилей на общей производственной линии, что приводит к снижению производственных затрат для малых и средних предприятий по сравнению со специализированными автоматизированными или основанными на ручном труде сборочными линиями [16].

Основными причинами внедрения роботов в промышленность являются необходимость работы в опасных условиях, выполнение повторяющихся задач, управление сложными процессами обработки и поддержание непрерывной работы [17,18]. Современный уровень развития робототехники, включающий системы управления и сенсорные технологии, обеспечивает безопасное использование этих систем на производственных и сборочных линиях, и эта безопасность распространяется на совместные операции, сочетая атрибуты производительности роботов с улучшенными когнитивными способностями и навыками принятия решений операторов-людей, что повышает общую эффективность производства и сборки [19,20].

В настоящее время автоматизация и робототехника находят широкое применение в промышленности и обществе в целом. Наиболее заметными являются следующие области применения.

1. Производство является одним из основных направлений применения автоматизации и робототехники. Автоматизированные сборочные линии стали главным залогом конкурентоспособности компаний [21], производящих широкий спектр продукции, от бытовой электроники до автомобилей. Роботы могут выполнять повторяющиеся и опасные задачи с высокими точностью и последовательностью. Их применение позволяет свести к минимуму количество дефектов, что приводит к выпуску продукции более высокого качества [22].
2. Здравоохранение, где робототехника достигла значительных успехов. Например, все большее распространение получает роботизированная хирургия, позволяющая проводить минимально инвазивные процедуры с высокой точностью [23]. Роботы также могут помочь в уходе за пациентами, например, в доставке лекарств или в реабилитации больных [24].
3. Логистика и складское хозяйство. Электронная коммерция и потребность в быстром выполнении заказов привели к внедрению робототехники в логистику и складское хозяйство. Автоматизи-

рованные управляемые транспортные средства и беспилотники используются для обработки материалов и комплектации заказов, что значительно ускоряет процесс и снижает риск ошибок при управлении запасами [25,26].

Сельское хозяйство, где роботы используются для выполнения таких задач, как посадка, сбор и контроль урожая. Эти машины могут работать непрерывно, повышая эффективность сельскохозяйственных операций [27]. Интеграция автоматизации и робототехники в сельское хозяйство просто необходима для удовлетворения растущего мирового спроса на продовольствие.

Сервис и развлечения, где робототехника также нашла свое применение в сфере услуг и развлечений. Роботы используются в качестве администраторов, гидов в музеях и даже в качестве товарищей-компаньонов для пожилых людей [28]. Развлекательные роботы, например, используются в тематических парках, улучшают впечатления посетителей и обеспечивают уникальную форму развлечений [29].

Несмотря на значительные достижения и прорывы в области автоматизации и робототехники, которые привели к появлению самых разнообразных сфер применения, в этих технологиях сохраняются ограничения, которые необходимо устранить, рассмотрим их последовательно.

1. Высокие первоначальные инвестиции. Первоначальные затраты на внедрение систем автоматизации и робототехники могут быть весьма значительными. Малым и средним предприятиям может быть сложно инвестировать в эту технологию, что препятствует ее широкому внедрению [30].
2. Сложность интеграции. Интеграция автоматизации и робототехники в существующие системы может быть сложной и трудной. Она требует глубокого понимания специфических потребностей отрасли и часто предполагает индивидуальные решения. Такая сложность может стать препятствием для многих предприятий [31].
3. Проблемы с персоналом: опасения, связанные с изменением количества рабочих мест. Хотя автоматизация и роботизация могут повысить эффективность и производительность, они также могут привести к сокращению рабочих мест. Крайне важно управлять этим переходом, повышая квалификацию персонала и фокусируясь на ролях, которые дополняют автоматизацию, а не увольняя операторов линий, которые раньше выполняли повторяющиеся задачи [11].
4. Безопасность: обеспечение безопасности работников и людей при работе роботов в общих пространствах имеет первостепенное значение. Для

предотвращения несчастных случаев и травм необходимо разработать стандарты безопасности и процедуры оценки рисков [33].

5. Отсутствие стандартизации: Отсутствие стандартизированных интерфейсов и коммуникационных протоколов может препятствовать взаимодействию различных систем автоматизации и робототехники [33]. Усилия по стандартизации продолжаются, но для достижения бесшовной интеграции необходим ещё больший прогресс.

Технологии и научные знания продолжают развиваться, поэтому будущее автоматизации и робототехники открывает многообещающие возможности и перспективы для будущих исследований, а именно:

1. Совместная работа человека и робота: Совместные роботы, или «коботы», находят все большее применение на производстве. Эти роботы работают вместе с человеком, повышая производительность при выполнении сложных задач [34]. Будущие разработки в этой области будут направлены на улучшение простоты программирования и гибкости этих систем [35].
2. ИИ и машинное обучение: достижения в области ИИ и машинного обучения приведут к созданию более интеллектуальных и адаптируемых роботов, способных учиться на своем опыте и постоянно улучшать свою работу [36].
3. Взаимосвязанные системы: интеграция робототехники и автоматизации с принципами Индустрии 4.0 приведет к созданию более взаимосвязанных систем [37], что приведет к повышению эффективности и производительности, сокращению времени простоя, а также улучшению распределения ресурсов [38].
4. Доступность: в настоящее время предпринимаются усилия по снижению стоимости и сложности внедрения автоматизации и робототехники. В результате технология станет более доступной для широкого круга отраслей, включая малые и средние предприятия [39].
5. Устойчивость: концепция устойчивого развития станет одним из ключевых направлений в будущем. Роботы и автоматизированные системы могут сыграть решающую роль в сокращении отходов и энергопотребления. Устойчивое развитие станет неотъемлемой частью автоматизации и проектирования робототехники [40].

Прежде чем перейти к одной конкретной задаче повышения эффективности реального промышленного процесса рассмотрим интересную и очень полезную тему цифровых двойников. Термин «цифровой двойник» не нов, но в сочетании с достижениями в области искусственного интеллекта он приобретает все большую ценность для трансформации промышленных процес-

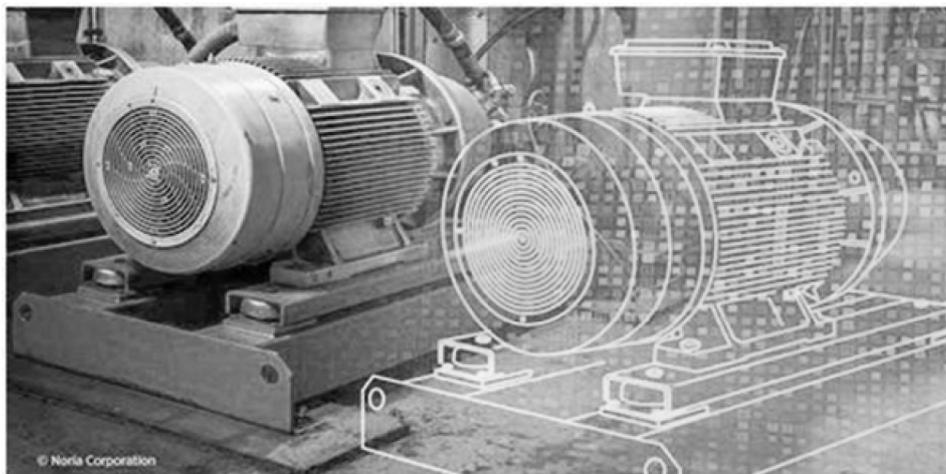


Рис. 1. Пример цифрового двойника электродвигателя [41]

сов, создавая дополнительную ценность для бизнеса. Цифровой двойник, создающий эволюционирующий профиль продукта, изделия или процесса на заводе, позволяет получить информацию о всех параметрах на протяжении всего жизненного цикла — проектирование, эксплуатация и техническое обслуживание. Цифровой двойник создает виртуальные копии физических объектов (рис. 1), производственных процессов и в сочетании с искусственным интеллектом позволяет операторам предприятий использовать полученные результаты для улучшения различных промышленных операций и процессов [41].

Концепция цифрового двойника предоставляет предприятиям возможность видеть свои операции и процессы, дает сведения о различных сценариях работы промышленных установок и процессов и помогает выявить условия для наибольшей эффективности [41].

Далее рассмотрим вопросы повышения эффективности конкретных промышленных процессов на реальном примере существующей задачи промышленной сварки.

Основной метод позиционирования, применяемый в промышленной сварке, заключается в использовании специализированных позиционеров: автоматизированных систем, которые отслеживают сварочный шов между заготовками. Этот метод позволяет достаточно точно позиционировать свариваемые заготовки [42], однако даже самые совершенные трекеры — это всего лишь манипуляторы, которые не могут адаптировать свои параметры позиционирования к сложной конфигурации конечного продукта.

Необходимость корректировки координат модели при позиционировании обусловлена тем, что сварные детали могут отличаться от своих 3D-моделей, например, из-за остаточной деформации при штамповке, неровных кромок, оставшихся после обрезки или резки и т.д.

Игнорирование этих факторов может привести к необходимости дополнительной доводки деталей, например, путем механической обработки, что замедляет весь процесс и не способствует получению полностью идентичных высококачественных деталей.

Эти проблемы в некоторой степени решаются с помощью специальных технологий компьютерного зрения [43]. Однако такие системы редко обеспечивают достаточно точное позиционирование; кроме того, они весьма чувствительны к различным помехам, таким как пригоревшие отложения, коррозия, брызги металла в мотеле, блики от дуговой сварки и т.д.

Решить эти проблемы возможно с помощью специального алгоритма (информационного модуля) для точной настройки координат позиционирования заготовки с целью минимизации несоосности. Для этого необходимо разработать метод, прототип интерфейса и фрагменты свариваемых элементов, которые будут свариваться в промежуточное изделие цилиндрической формы.

Разработанная CAD-модель не учитывает различные деформации, возникающие при подготовке заготовок к сварке. Правильно настроенное сварочное оборудование и хорошая программа контроля позволят получить продукт наилучшего качества. Однако реальный производственный опыт доказывает невозможность точного воспроизведения модели, так как всегда имеют место пружинение, память формы и другие эффекты, присущие деталям из металла.

При подготовке заготовки подвергаются механическим, термическим и различным воздействиям, которые могут повлиять на их геометрическую форму [44]. Это могут быть деформации в свариваемых кромках, вызванные механическим воздействием штамповки или механической обработкой. При сварке таких заготовок по идеальным моделям получаются швы крайне низкого

качества. Поэтому необходимо синтезировать алгоритм для корректировки положения в реальном времени на основе конфигурации свариваемых поверхностей.

Анализ методов позиционирования заготовок, используемых при роботизированной сварке, показывает, что большинство из них учитывают только некоторые метки, предварительно нанесенные на заготовку для корректировки сварного шва.[45]. Поэтому предлагается принципиально иная концепция, основанная на 3D-сканировании заготовок перед сваркой [46]: 1) 3D-сканирование заготовок; 2) модель заготовки в формате STL; 3) формирование моделей сварных поверхностей; 4) поиск оптимального положения заготовки; 5) координаты смещения заготовки относительно оригинала; 6) передача данных в блок управления.

Это решение удачно основано на том, что специализированные сканеры могут создавать очень точные 3D-модели заготовок; дальнейший анализ генерирует глобальные координаты для смещения заготовок, чтобы максимизировать площадь контакта сварных поверхностей для лучшего сварного шва. В этом случае точность позиционирования напрямую зависит от точности манипуляторов и 3D-сканеров. Современное оборудование обеспечивает точность до десятых долей миллиметра, что значительно лучше, чем при любом другом методе позиционирования.

Таким образом, решение проблемы позиционирования заготовок при роботизированной сварке остается сложной задачей, для которой необходимо разработать алгоритм поиска оптимального положения заготовок на основе конфигурации для последующей сварки [47]. В качестве критерия оптимальности здесь предлагается использовать стандартное расстояние между рассматриваемыми точками поверхности, поскольку этот показатель напрямую связан с объемом пустого пространства между двумя поверхностями (объемом сварного шва) [46].

Концепция алгоритма поиска оптимального положения заготовок при роботизированной сварке заключается в следующих этапах: 1) формирование массива точек, лежащих на кромках свариваемых поверхностей; 2) поиск наибольшей площади контакта при продольных смещениях в пределах припусков; 3) поиск наибольшей площади контакта при повороте заготовок в пространстве относительно координатных осей; 4) поиск максимального поперечного сдвига; 5) отображение значений смещения заготовок относительно системы глобальных координат.

Алгоритм оптимального позиционирования представляет собой следующие этапы. Первым этапом является импорт 3D-объекта и генерация моделей сварных

поверхностей. Все остальные расчеты выполняются на основе сгенерированных поверхностей. Следующий этап — поиск оптимального положения при продольном перемещении заготовок (вдоль шва); смещение не должно превышать допусков. На этом этапе вычисляется стандартное расстояние между рассматриваемыми точками свариваемых поверхностей, т.е. насколько близко поверхности могут быть приближены друг к другу на каждой итерации. Каждая итерация описывается расстоянием между наибольшими значениями рассматриваемых точек. Чем больше это расстояние, тем больше площадь контакта при соединении заготовок [46].

Алгоритм основан на итерационном смещении и вычислении ключевого показателя на каждой итерации. Количество итераций зависит от приращения смещения. Важно, что алгоритм основан на предположении, что точки поверхности за пределами игнорируются. Смещение должно быть в пределах допусков и не превышать 0,1 мм.

Оптимальное положение выбирается путем оценки всех возможных смещений. В результате получают данные о стандартных расстояниях между точками поверхности, а также максимальные расстояния от поверхности до поверхности для всех итераций продольного/бокового смещения.

Оператор системы использует эти данные, чтобы решить, подтвердить ли предложенную автоматикой конфигурацию или выбрать итерацию самостоятельно. Для этого алгоритм позволяет отслеживать максимальное и среднее расстояния между свариваемыми поверхностями. При ручном управлении у оператора есть несколько вариантов смещения. Это необходимо для сложных случаев, когда входных данных недостаточно для принятия решения. В результате для итерации со смещением, выбранным пользователем получают данные о максимальных и средних значениях, распределение максимальных и средних расстояний между точками поверхности за одну итерацию смещения [46].

Следующий этап — поворот заготовок относительно их координатных осей. Процедура идентична той, что выполняется при продольном смещении.

Таким образом, программа генерирует координаты для смещения заготовки, чтобы максимизировать площадь контакта с поверхностью. Это обеспечивает более точное позиционирование, а значит, снижает вероятность брака, уменьшает необходимость последующей обработки и значительно снижает трудозатраты оператора.

Расчеты показывают, что внедрение такого модуля несколько усложнит процесс и увеличит продолжитель-

ность производственного цикла. Цикл увеличится примерно на 3–5 минут в зависимости от формы и размера заготовки. Это включает в себя время на сканирование заготовок, анализ данных, поиск оптимального положения и передачи координаты на блок управления. Для большинства сварочных операций такое удлинение цикла не является критичным.

Среднее расстояние между рассматриваемыми точками свариваемых поверхностей напрямую коррелирует с объемом пространства между плоскостями. Испытания прототипа показали следующее: 1) продольные смещения сокращают среднее межповерхностное расстояние на 7 %; 2) дальнейшие повороты вокруг координатных осей уменьшают среднее расстояние на 10 %. Достижение этой цели снижает процент брака до 14 %. Таким образом, значительно повышается эффективность промышленного процесса сварки сложных деталей [46].

В заключение следует отметить, что были рассмотрены различные аспекты автоматизации и роботизации

промышленных процессов. Конечно, в наличии имеется намного большее количество инструментов и их трансформаций. Тем не менее, необходимо хорошо представлять, что в ограниченных рамках невозможно уделить абсолютно каждому аспекту и инструменту. Автоматизация и робототехника оказали значительное влияние на промышленные процессы, повысив их эффективность, точность и гибкость. Внедрение этих технологий в производство, здравоохранение, логистику, сельское хозяйство и другие отрасли принесло множество преимуществ. Однако такие проблемы, как высокая первоначальная стоимость, сложность, нарушение работы персонала, проблемы безопасности и отсутствие стандартизации, все еще препятствуют более широкому применению этих технологий. Тем не менее, будущее автоматизации и робототехники многообещающе, и в настоящее время определены основные направления исследований и улучшений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Цветаев С.С., Логачев К.И. Актуальные проблемы автоматизации промышленных предприятий / Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2012, №1, С. 87–89.
2. Туккель И.Л. Завтра, технологическое завтра, наступило вчера // Инновации. 2017. № 11. С. 3–5.
3. Платонов В.Р. Переход к киберфизическим системам управления Индустрии 4.0 в энергетике и электротехнике промышленных объектов / Экономика: вчера, сегодня, завтра, 2022, Т. 12, №. 4А, С.406–411.
4. Фонтана К.А., Ерзкян Б.А. «Умная фабрика» и ключевые технологии Индустрии 4.0 (обзор) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2022. № 4. С. 53–67.
5. Ковалев А.В., Сальников В.С. Интеллектуальная система технического обслуживания промышленного оборудования на основе прогнозной модели / Известия ТулГУ. Технические науки, 2017, Вып.8., Ч.2, С.265–270.
6. Алтухов А.И., Дудин М.Н., Анищенко А.Н. Оптимизация энергопотребления на предприятиях АПК с использованием технологий «умное производство» (промышленный Интернет вещей) / Проблемы рыночной экономики. — 2019 — № 1 — С. 58–66.
7. Взаимодействие человека и робота в коллаборативных робототехнических системах / Р.Р. Галин, В.В. Серебряный, Г.К. Тевяшов, А.А. Широкий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4), С.180–199.
8. Галин Р.Р. Сотрудничество человека и робота на примере коллаборативной робототехники // XIV Международная конференция по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения-2019», Санкт-Петербург, 17–20 апреля 2019 года, Санкт-Петербург, 17–20 апреля 2019 года, С.241–246.
9. Neythalath, N.; Søndergaard, A.; Bærentzen, J.A. Adaptive robotic manufacturing using higher order knowledge systems. Autom. Constr. 2021, 127, 103702.
10. ГОСТ Р 60.0.0.4-2019. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения
11. Опришко В.Д., Машихин А.Ю. Проектирование и разработка прототипа программного обеспечения на основе технологии RFID для умного дома // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral», 2023, №3, С.537–549.
12. Михайлов Б.Б., Назарова А.В., Ющенко А.С. Автономные мобильные роботы — навигация и управление / Известия ЮФУ. Технические науки. Раздел I. Технологии управления и моделирования. С.48–67.
13. Антонов А.В., Воронников С.А. ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии, 2016, № 2 (34), С.58–69
14. Moghaddam, M.; Nof, S.Y. Parallelism of pick-and-place operations by multi-gripper robotic arms. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 42 (3), pp. 135–146.
15. Галин Р.Р. Умное производство. взаимодействие человека и робота // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении», Санкт-Петербург, 2020. С. 196–198.
16. Villani, V.; Pini, F.; Leali, F.; Secchi, C. Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. Mechatronics 2018, 55, 248–266.
17. Варшавский А.Е., Дубинина В.В. Мировые тенденции и направления развития промышленных роботов // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2020. Т. 11. № 3. С. 294–319.
18. Галин Р.Р., Серебряный В.В., Тевяшов Г.К., А.А. Широкий. Взаимодействие человека и робота в коллаборативных робототехнических системах / Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4), С. 180–199.
19. Химиченко А.А. Перспективы робототехники / Всероссийский экономический журнал ЭКО, 2008, С. 77–86

20. Юревич Е.И. Основы робототехники. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 416 с.
21. Маслов А.Р. Применение многооперационных станков в автомобильной промышленности / Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты, 2006, С.23–25
22. Единое решение для роботизированного ударного упрочнения штампов в автомобилестроении / CAD/CAM/CAe Observer, 2017, №8(116), С.70–72.
23. Уханов М.М., Иващенко А.В., Федяев И.М., Яблоков А.Е., Колганов И.Н., Тлустенко В.П. Применение робот-ассистированных систем для операций в области головы и шеи / Голова и шея, 2019; 7(2), С.52–63
24. Цветкова Л.А., Черченко О.В., Шептунов С.А. Оценка перспектив развития медицинской робототехники в России в проекции патентного анализа / Врач и информационные технологии, 2015, №3, С.49–63.
25. Хрущёва М.Ю. Автоматизация складских комплексов (на примере компании «Amazon») / Colloquium-journal, 2019, С.141–142.
26. Балувев М.С. Перспективы использования робототехники для выполнения логистических работ / Теория и практика сервиса: экономика, социальная сфера, технологии. 2021. № 2 (48), С.24–28.
27. Черненко А.Б. и др. Особенности применения роботизированных платформ в сельском хозяйстве / Проблемы современной науки и образования, 2020, №8, С.18–23.
28. Коллективы интеллектуальных роботов. Сферы применения / под ред. В.И. Сырымкина. — Томск: СТТ, 2018. — 140 с. (Серия: «Интеллектуальные технические системы») (подсерия: «Когнитивная робототехника»).
29. Нельзина О.Ю., Окорочков А.В., Поляков Т.П. Тематические парки как учреждения музейного типа: проблемы и перспективы / О.Ю. Нельзина, А.В. Окорочков, Т.П. Поляков. — М.: Институт Наследия, 2019 — 288 с.
30. Barton, M.; Budjac, R.; Tanuska, P.; Gaspar, G.; Schreiber, P. Identification overview of industry 4.0 essential attributes and resource-limited embedded artificial-intelligence-of-things devices for small and medium-sized enterprises. Applied Sciences, 2022, Vol. 12, №. 11, art. no. 5672, 26 pages.
31. Сырецкий Г.А. Робототехника и автоматизация производства: современное состояние / Интерэкспо Гео-Сибирь, 2017, №2, Т.5, С.24–29.
32. Зоргнер А. Автоматизация рабочих мест: угроза для занятости или источник предпринимательских возможностей? / Форсайт, 2017, Т. 11, № 3, С.37–48.
33. Черепанов Н.В. Проблемы внедрения технологии промышленного интернета вещей / Инновации и инвестиции, 2019, №11, С.160–163.
34. Довгаль В.А., Козлова Н.Ш. Анализ актуальности использования коллаборативных роботов для процесса производства компонентов возобновляемых источников энергии / Вестник АГУ, 2023, Вып.2, С.68–73
35. Халл, Т., Рентюк, В. Что необходимо знать о коллаборативных роботах / Т. Халл, В. Рентюк. — Control Engineering Россия. — 2019. — № 6. — С. 48–51.
36. Гончаров А.М., Рябов С.В. Искусственный интеллект как основное направление развития робототехнических комплексов / Военная мысль, 2021, № 6, С.65–70
37. Лясковская Е.А. Индустрия 4.0 и устойчивое развитие: от устойчивых бизнес-моделей к цифровой устойчивости / Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент», 2021. Т. 15, № 4. С. 73–83
38. Ерзикаян Б.А., Фонтана К.А. Технологии Индустрии 4 — фактор, способствующий внедрению циркулярной экономики для достижения устойчивого развития (обзор зарубежной литературы) // Проблемы рыночной экономики. — 2022 — № 3 — С. 59–77.
39. Фролов В.Г., Дробот Е.В., Абрамов Е.Г. Реализация стратегий Индустрии 4.0 российскими и зарубежными предприятиями: возможности для российской текстильной промышленности / Технология текстильной промышленности, 2022, № 2, С.312–323.
40. Кожевина О.В., Салиенко Н.В. Устойчивое развитие и цифровая трансформация промышленного сектора // Вестник МИРБИС. 2019 № 3 (19). С. 6–13.
41. Ron Beck. Digital Twins and AI: Transforming Industrial Operations, Reliable Plant, 2020.
42. Ken Chen. A path-planning algorithm of the automatic welding robot system for three-dimensional arc welding using image processing / Ken Chen, Guang-Zhong Cao, Jun-Di Sun, Jun-Jun Yang // 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). — 2017.
43. Chengtao C. Unfeatured Weld Positioning Technology Based on Neural Network and Machine Vision / C. Chengtao, W. Boyu, L. Yue, Y. Yongjie // IEEE 3rd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC). — 2018.
44. Gorkavyu, M.A. Intelligent System for Prognostication and Optimization of Power Expenses of Technological Processes at Robotized Productions / M.A. Gorkavyu; A.S. Gudim; A.Y. Efimov; Denis B. Solovev // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). — 2018.
45. Li Wen — Boo. A calibration algorithm of the structured light vision for the arc welding robot / Wen-Bo Li, Guang-Zhong Cao, Jun-Di Sun, YuXin Liang, Su-Dan Huang // 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). — 2017.
46. Efimov A.Y., Gorkavyu M.A., Gorkavyu A.I., Solovev D.B. Improving the efficiency of automated precision robotics-enabled positioning and welding / 2019 International science and technology conference «Eastconf», Eastconf, 2019.
47. Li, Xinde. A Robust Welding Seam Identification Method / Xinde Li, Xiangheng He, Mohammad Omar Khyam, Shuzhi Sam Ge // 3rd International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM). — 2018.

© Чжан Чэнь (zhangchen2120@outlook.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»