



Физический ИИ – будущее промышленной автоматизации

Юрий Широков

Технологические прорывы раздвигают границы – задачи, которые когда-то были слишком сложными или дорогостоящими для автоматизации, теперь являются как технически выполнимыми, так и экономически жизнеспособными. Хотя традиционные промышленные роботы уже давно являются фундаментом автоматизации, их развитие на протяжении длительного времени сдерживалось ограниченной способностью к адаптации, а также высокими затратами на интеграцию и перенастройку под новые задачи. Сегодня промышленность вступает в качественно новую эпоху робототехники, в которой ключевую роль играют интеллектуальность и гибкость систем, обеспеченные конвергенцией передовых аппаратных решений, искусственного интеллекта и технологий компьютерного зрения. В совокупности эти факторы формируют принципиально новые возможности для применения робототехнических систем.

Вступление

Современные подходы, включающие методы машинного обучения, такие как обучение с подкреплением и имитационное обучение, а также внедрение мультимодальных базовых моделей для робототехники, в сочетании с инновационными аппаратными компонентами, например, мягкими захватами и тактильными датчиками, позволяют роботам эффективно функционировать в условиях вариативности обстановки, учитывать контекст выполняемых операций и адаптироваться к изменениям в режиме реального времени. Существенное упрощение процессов внедрения роботизированных систем, в том числе за счёт использования виртуального обучения и интуитивно понятных пользовательских интерфейсов, значительно сокращает время выхода на экономическую эффективность и делает такие технологии доступными не только крупным промышленным предприятиям, но и малым и средним производителям, а также компаниям в сфере логистики. По этой причине в рамках данной статьи термин «производители» используется в качестве обобщающего

обозначения указанных категорий участников рынка.

Сегодня – самое время

Современные производственные компании оказались на переломном этапе своего развития. Хронический дефицит рабочей силы, рост издержек и нестабильность глобальных цепочек поставок, усугубляемые геополитической и рыночной неопределённостью, формируют совокупный фон, угрожающий производительности, прибыльности и устойчивости бизнесов. Одновременно усиливаются и требования со стороны потребителей: возрастает спрос на оперативность, индивидуализацию продукции и экологическую ответственность, что требует качественного изменения гибкости операционных процессов.

Под воздействием перечисленных факторов ускоряется поиск прорывных решений на базе передовых технологий. В центре этих изменений находится робототехника, переживающая глубокую трансформацию. Если ранее её роль ограничивалась локальным повышением эффективности, то сегодня она становится стратегическим ин-

струментом обеспечения конкурентоспособности. Робототехника вступает в новую фазу развития, где интеллект обеспечивает автономность, а концепция физического искусственного интеллекта переопределяет границы возможностей машин и, как следствие, человека.

С момента появления в 1960-х годах промышленные роботы сыграли ключевую роль в трансформации производственных процессов, особенно в таких отраслях, как автомобилестроение и электроника, где массовое стандартизированное производство оправдывало значительные инвестиции. Однако их внедрение оставалось прерогативой крупных предприятий с высоко стандартизированными процессами. Малые и средние производители, а также компании с вариативными производственными задачами, фактически оставались вне этой технологической волны из-за высокой стоимости, сложности интеграции и недостаточной гибкости решений.

Сегодня ситуация стремительно меняется. Робототехника эволюционирует в сторону интеллектуальных систем, способных обучаться, адаптироваться

и действовать автономно. Этот переход знаменует собой один из ключевых этапов в истории автоматизации и обусловлен конвергенцией аппаратных средств робототехники, технологий искусственного интеллекта и систем машинного зрения.

Масштабы внедрения робототехники быстро растут. По состоянию на 2023 год в мире было установлено более 4 миллионов промышленных роботов. Параллельно развитие программного и аппаратного обеспечения существенно расширяет функциональные возможности таких систем – от высокоточной манипуляции объектами до автономной навигации – и значительно снижает объём инженерных усилий, необходимых для их внедрения. На этом фоне ускоряется и инновационная активность: растёт число стартапов и объём инвестиций, стимулируемых потенциалом физического ИИ. Формируются новые технологические направления, простирающиеся от базовых моделей для робототехники до универсальных роботов общего назначения, включая и гуманоидные системы.

В условиях ускоряющихся изменений перед стратегическими руководителями бизнеса встаёт ряд принципиальных вопросов: какие технологические прорывы лежат в основе текущей трансформации; каким образом робототехника уже меняет производственные процессы, структуру занятости и конкурентную динамику отраслей; и какие технологические и кадровые основы необходимо заложить уже сегодня, чтобы обеспечить готовность бизнеса к будущему.

Технологические прорывы

Последние достижения в области программного и аппаратного обеспечения привели к качественному скачку в развитии робототехнических систем, позволив им выполнять сложные задачи в динамически изменяющихся средах при значительно более простом развёртывании. Существенный вклад в эти изменения внесли прогресс в области искусственного интеллекта и развитие высокоточных систем моделирования, которые стали возможны благодаря ускоренным вычислениям с использованием графических процессоров (GPU).

Современные вычислительные мощности позволяют выполнять сложные модели и алгоритмы искусственного интеллекта в режиме реального вре-

мени, что открывает принципиально новые области применения робототехники. В основе этого подхода лежит концепция наделения роботов способностью воспринимать окружающую среду, планировать свои действия и выполнять их в условиях реального мира. Таким образом, формируется уровень так называемого физического интеллекта (Physical AI), при котором машины способны не только выполнять заданные операции, но и адаптироваться к изменяющимся условиям, принимая решения на основе текущего контекста.

Расширенное восприятие

Достижения в области сенсорных технологий и искусственного интеллекта радикально повысили способность роботов воспринимать окружающую среду. Доступные камеры с высоким разрешением, системы лидарного сканирования (LiDAR), а также тактильные датчики нового поколения формируют значительно более насыщенный поток первичных данных. Одновременно с этим современные алгоритмы компьютерного зрения, основанные на глубоком обучении, обеспечивают уровень визуального восприятия, приближающийся к человеческому.

В результате роботы получили возможность в реальном времени распознавать и интерпретировать сложные сцены: идентифицировать объекты, определять их объёмно-пространственную ориентацию и оценивать их физические свойства. Эти возможности являются ключевыми предпосылками для формирования понимания того, как взаимодействовать с объектами. В совокупности данные технологии позволяют роботам «видеть» и осмысливать окружающую среду с беспрецедентной точностью.

Автономное принятие решений и планирование

Именно инновации в области искусственного интеллекта и программного обеспечения позволили роботам принимать осмысленные решения в режиме реального времени. В отличие от жёстко заданных программ, современные системы используют методы обучения с подкреплением и моделирование, позволяя формировать поведение через многократные итерации и отработку ошибок в виртуальной среде.

Высокоточные физические симуляторы и методы доменной рандомиза-

ции, предполагающие варьирование параметров среды (например, освещённости или коэффициента трения), существенно сокращают разрыв между симуляцией и реальным миром. Это обеспечивает перенос закреплённых моделей поведения на реальные устройства без потери эффективности.

Дополнительный импульс развитию придают базовые (foundation) модели, объединяющие зрение, язык и действия. Такие системы, как Gemini Robotics от Google DeepMind и Isaac GR00T от Nvidia, обрабатывают мультимодальные входные данные и формируют адекватные задаче выходные команды. Это обеспечивает более естественное взаимодействие человека и машины, а также значительно улучшает контекстное понимание.

В результате становится возможным построение сложных рабочих сценариев: получив цель (например, разгрузка партии товара), система самостоятельно формирует последовательность действий – от вскрытия упаковки товара до использования погрузчика. Таким образом, роботы переходят от выполнения отдельных операций к реализации целостных многошаговых процессов, приближаясь к человеческому уровню интуитивного планирования и принятия решений.

Точная манипуляция и мобильность

Прогресс в области материаловедения, приводных систем и конструкций роботов существенно расширил их физические возможности. Аппаратные инновации – от высокоточных приводов с контролем усилия до мягких роботизированных захватов – обеспечили высокий уровень точности и гибкости при работе с объектами.

Современные роботы способны надёжно захватывать предметы сложной формы и хрупкие объекты, что в рамках жёстко запрограммированных движений было практически недостижимо. Эти возможности обеспечиваются интеллектуальными системами управления, в реальном времени регулирующими силу захвата и параметры взаимодействия.

Ключевым фактором прогресса стало внедрение тактильной чувствительности: современные датчики позволяют роботам получать обратную связь о давлении и скольжении/трении, что приближает уровень манипуляций роботизированной руки к человеческой.

Увеличение времени работы за счёт повышения ёмкости современных аккумуляторных батарей существенно расширяет возможности мобильных платформ и повышает их автономность.

Кроме того, робототехника выходит за рамки традиционных форм-факторов: появляются четвероногие роботы, гуманоидные системы, мобильные манипуляторы и разные гибридные конструкции, что значительно расширяет спектр промышленных применений. В совокупности эти достижения позволяют роботам не только воспринимать и анализировать окружающую среду, но и эффективно взаимодействовать с ней с высоким уровнем точности и автономии.

Сквозная автоматизация

Развитие перечисленных технологических возможностей привело к эволюции робототехники от систем, основанных на жёстко заданных правилах и явном программировании, к системам, обучаемым на основе данных, приобретающим навыки как в реальной среде, так и в процессе симуляционного обучения, и далее – к контекстно-ориентированным роботам, способным выполнять задачи автономно без предварительного обучения за счёт методов zero-shot learning (парадигма машинного обучения, в которой модель способна распознавать классы задач, ни одного примера которых она не видела на этапе обучения).

Прогресс во всех трёх направлениях радикально трансформирует производственные процессы, расширяя границы автоматизации и охватывая задачи, ранее считавшиеся принципиально не поддающимися автоматизации. Роботы переходят от выполнения строго заданных операций к гибкому поведению в условиях неопределённости и вариативности.

Ключевым аспектом этой трансформации является не замещение одних подходов другими, а их сосуществование. Все три класса робототехнических систем формируют взаимодополняющую экосистему, в рамках которой каждый подход находит своё применение в зависимости от требований к задаче, степени её изменчивости и экономической целесообразности.

Такой комплексный подход позволяет выстраивать многоуровневые стратегии автоматизации, адаптированные к конкретным операционным условиям. По мере того как предприя-

тия и логистические комплексы переходят к более высокому уровню автоматизации, будет формироваться гибридная инфраструктура, включающая различные типы робототехнических систем и форм-факторов – от автономных мобильных роботов (AMR) до гуманоидных платформ. Их выбор будет определяться характером задач, экономической эффективностью внедрения и особенностями производственных процессов.

Три уровня роботизации: от правил к контексту

Выбор типа роботизированной системы напрямую зависит от характеристик производственного процесса (рис. 1).

- **Роботы на основе правил** продолжают обеспечивать непревзойдённую точность и стабильное время

цикла в структурированных и повторяющихся процессах. Такие системы широко применяются в автомобилестроении и аналогичных производствах, где критически важна последовательность и низкая вариативность (повторяемость) операций. Современные разработки в области интерфейсов программирования и генеративного ИИ (например, Siemens Industrial Copilot для AI-поддержки PLC-программирования) расширяют сферу их применения и упрощают внедрение.

- **Роботы на основе обучения** становятся всё более востребованными в средах с переменными условиями. Используя передовые алгоритмы обучения с подкреплением и симуляции, эти системы учатся как в виртуальной, так и в реальной среде. Виртуализация обучения сокращает за-

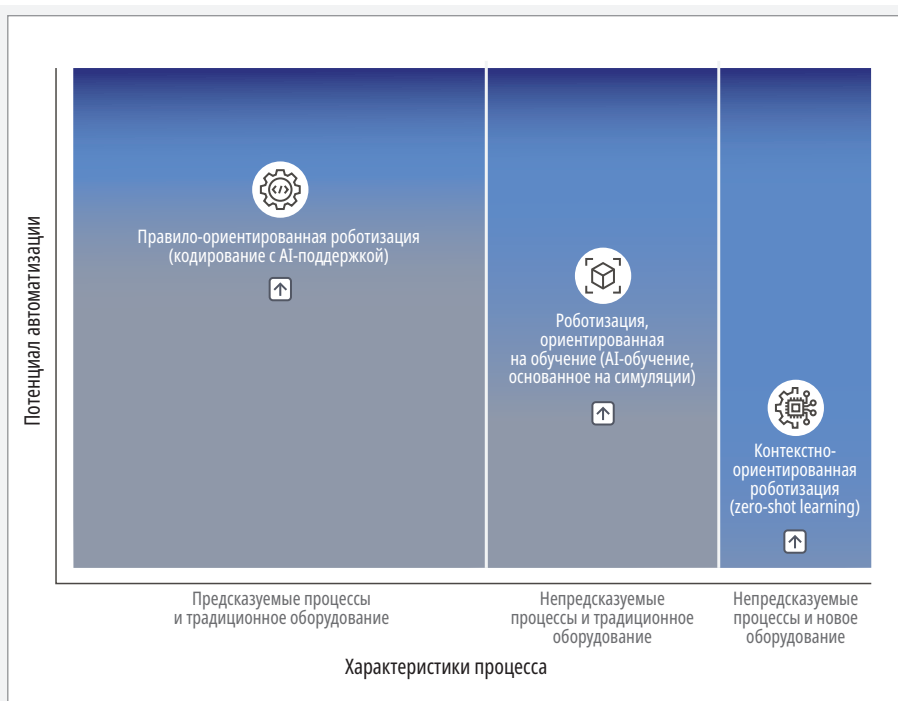


Рис. 1. Physical AI расширяет границы автоматизации в промышленности

Как интерпретировать рис. 1.

Серый фон – задачи, которые уже есть возможность автоматизировать посредством имеющихся технологий.

Голубой фон – возможность автоматизации ожидается в ближайшем будущем.

Характеристики процесса (ось X) определяются параметрами, такими как положение объекта, его ориентация и размер, а также тем, работает ли система в известной или новой среде.

- **Предсказуемые процессы:** параметры либо постоянны, либо изменяются только в строго контролируемом диапазоне

не, что позволяет выполнять операции детерминированно и воспроизводимо без необходимости адаптивного поведения.

- **Непредсказуемые процессы:** параметры значительно варьируются или не поддаются предварительному прогнозированию.
- **Новые среды:** сценарии, компоновки, объекты или задачи выходят за пределы обучающей выборки робота (например, другая производственная линия, неизвестные детали или изменённая конфигурация склада). ●

траты на развёртывание систем, позволяя проверять поведение роботов в симуляции перед вводом в производство. Такие системы эффективны при контролируемой вариативности, например, при комплектовке гибких деталей или адаптивной логистике, и становятся жизнеспособными в средних или нерепетитивных сериях, где роботы на основе правил теряют преимущество.

- **Роботы на основе контекста**, новейшее направление, используют фундаментальные модели робототехники на основе обучения с нулевым примером для автономного восприятия, рассуждений и действий в новых сценариях. Они способны интерпретировать высокоуровневые команды и реагировать на сложные ситуации реального мира без предварительного обучения под конкретную задачу. Фундаментальные модели формируют когнитивное ядро, позволяя контекстным роботам, включая гуманоидов, гибко выполнять разнообразные задачи в разных условиях без перепрограммирования.

Три типа систем – на основе правил, обучения и контекста – формируют слоистую стратегию автоматизации. Их границы нередко размыты, и один робот может использовать гибридный подход. Например, в коллаборативной сборочной ячейке робот может следовать логике на основе правил для точного выполнения операций, одновременно контролируя среду через системы восприятия. При отклонениях, например, при отсутствии детали или вмешательстве в процесс человека, система переключается на контекстное рассуждение, интерпре-

тирует ситуацию и автономно решает проблему, после чего возвращается к исполнению по правилам.

Интеллектуальная робототехника меняет правила игры

Технологические достижения открывают ранее недоступные применения роботов, однако ключевая трансформация заключается не только в новых технических возможностях, но и в экономической целесообразности их внедрения.

Как показано на рис. 2, будущее интеллектуальной робототехники определяется упрощённым развёртыванием систем и более интуитивным взаимодействием человека и машины. Это сокращает сроки внедрения и повышает масштабируемость.

С расширением возможностей физического ИИ и снижением требований к специализированным навыкам и индивидуальной настройке под конкретные задачи автоматизация становится экономически оправданной для гораздо более широкого спектра операций. Такой сдвиг не только открывает новые сценарии применения, но и принципиально меняет экономику автоматизации в целом.

Нерешённые ограничения в развитии робототехники

Несмотря на быстрый прогресс, ряд задач остаётся нерешённым. Среди них: нехватка данных, развитие 3D-пространственного интеллекта и обеспечение универсальной ловкости роботов.

- **Нехватка данных.** Большие языковые модели (LLM) получили широкое

распространение благодаря возможности собирать огромные объёмы данных из Интернета. Эти модели «переварили» множество веб-сайтов и книг, что обеспечило им эффективность обучения. Физический ИИ также требует больших объёмов качественных данных, однако специализированные наборы данных для робототехники остаются ограниченными и дорогостоящими, так как их необходимо собирать в реальных условиях производств. Эта проблема постепенно решается за счёт прогресса в области синтетических данных. Фотореалистичная визуализация и методики «domain randomization» (техника в машинном обучении, которая позволяет генерировать синтетические данные, имитирующие вариативность реальных сред) позволяют моделировать различные условия освещения, текстуры и формы объектов в виртуальной среде, обучая роботов распознавать и захватывать предметы в разнообразных реальных ситуациях. В сочетании с усилиями по разработке открытого программного обеспечения и ускоренным внедрением реальных роботизированных производств такие подходы постепенно сокращают разрыв в данных и значительно повышают эффективность обучения. Например, компании вроде Sanctuary AI начали с телеуправления – оператор управляет одним или несколькими роботами, одновременно собирая данные. В дальнейшем эти данные будут использоваться для обучения тех же роботов автономной работе. Технологии от Nvidia и других производителей поз-

	Область автоматизации	Процесс внедрения	Временные затраты	Масштабируемость	Человеко-машинное взаимодействие
Сегодня 	Эффективно в предсказуемых задачах или в контролируемых сценариях с известными объектами	Высокие трудозатраты на программирование и обучение	Средние/длительные сроки внедрения в промышленность (несколько месяцев/недель на программирование и реализацию)	Ограниченная масштабируемость между схожими конфигурациями или сценариями применения	Человек может адаптировать робота через интерфейсы или направляя его действия
В будущем 	Непредсказуемые сценарии и неизвестные объекты (например, случайный захват из контейнера)	Требует относительно меньших инженерных усилий благодаря обучению и самообучению (до 70% экономии усилий)	Ускоренное внедрение с использованием few-shot/zero-shot обучения (до 50% сокращение времени)	Гибко масштабируется для выполнения различных задач, в разных средах и на разных типах роботов	Обеспечивает интуитивное управление с помощью естественного языка жестов или голосовых команд
	← Технологически осуществимо →	← Экономически целесообразно →			

Рис. 2. От автоматизации к автономии: как изменится промышленность с развитием Physical AI

воляют создавать многочисленные правдоподобные сценарии и вариации на основе реальных или синтетических данных, фактически выполняя автоматическое масштабирование обучающей информации, основанное на реальных физических принципах.

• 3D-пространственный интеллект.

Нехватка данных остаётся ключевым препятствием для полноценного восприятия, анализа и взаимодействия с комплексными трёхмерными средами. Тем не менее прогресс ускоряется. Такие стартапы, как World Labs и Covariant, а также ведущие академические центры для создания устойчивого пространственного взаимодействия применяют симуляцию на основе данных из реального мира и мультимодальных архитектур ИИ. Модели «Vision–Language–Action» (VLA) развиваются как перспективное направление, а фундаментальные модели открывают возможности для обобщаемых способностей пространственного рассуждения.

• Обобщаемая ловкость с высокой степенью свободы. Достижение ловкости на уровне человека остаётся

передовой задачей из-за механических, сенсорных и вычислительных ограничений. Например, роботизированные руки должны работать с высокой степенью свободы (часто более 20 суставов), что делает планирование движений в реальном времени, управление усилием и предотвращение коллизий крайне сложными. Ключевым условием прогресса в этой области является развитие 3D-пространственного интеллекта: точная манипуляция зависит от корректного восприятия геометрии объекта, его положения и частичной видимости. Фундаментальные модели, интегрирующие понимание трёхмерной сцены с планированием манипуляций, позволяют роботам выбирать оптимальные стратегии захвата, адаптироваться к вариативности объектов и выполнять корректирующие действия при изменении условий.

Хотя робототехника продолжает быстро развиваться, а технологические прорывы расширяют границы возможного, решение этих задач остаётся критически важным для внедрения автоматизации. Среди ключевых направлений, требующих внимания, на-

ходится и кибербезопасность: по мере того как фабрики и склады становятся всё более программно-определяемыми, а роботизированные системы взаимосвязанными, уязвимость к киберугрозам возрастает.

Надёжная защита от потенциальных сбоев и утечек данных становится необходимым условием безопасного и надёжного функционирования автоматизированных предприятий.

Где работает интеллектуальная робототехника

Интеллектуальная робототехника открывает новые возможности во всех производственных сферах и отраслях, а ранние её пользователи уже модернизируют свои процессы.

Новое поколение роботизированных систем способно решать сложные, вариативные и требующие высокой ловкости задачи, которые ранее казались недостижимыми для автоматизации. Этот раздел статьи посвящён разнообразию новых сценариев применения по всей промышленной цепочке создания ценности и показывает, как первые внедрения переопределяют возможности автоматизации.

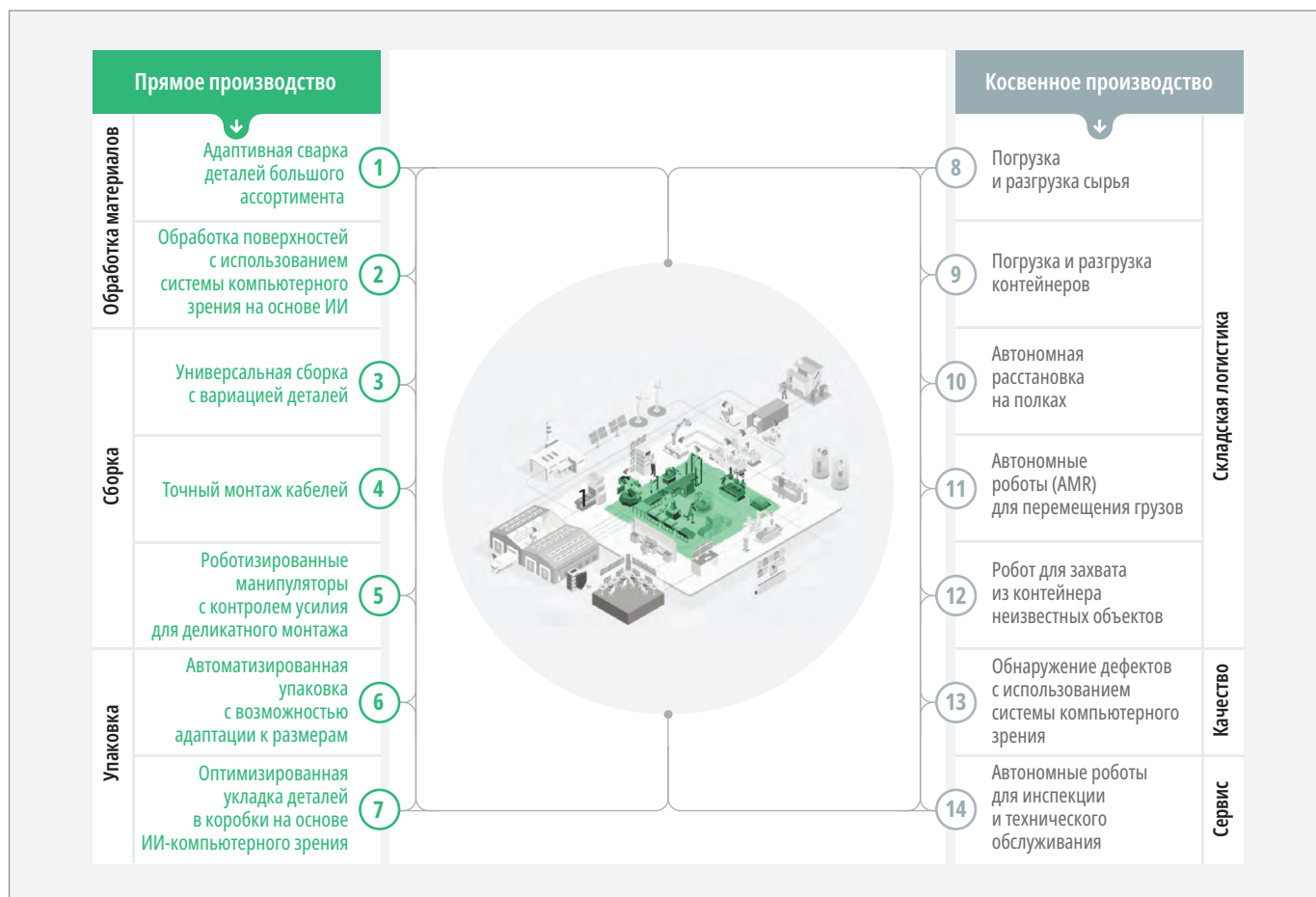


Рис. 3. Как Physical AI трансформирует операции на заводах и складах

Революция в производственной цепочке создания ценности

Сегодня интеллектуальные роботы перестали быть ограниченными и высокозатратными сущностями в себе. Они автоматизируют широкий спектр операций по всей производственной цепочке во многих отраслях – от обработки материалов и точной сборки до упаковки, внутренней логистики, контроля качества и сервисного обслуживания.

Эти возможности не являются теоретическими – они реальны и осязаемы уже сегодня, и это меняет представления о возможностях автоматизации. Физический ИИ открывает новое поколение высокоэффективных применений во всех отраслях (рис. 3).

Инновации в прямом производстве, такие как адаптивная сварка, чувствительная к усилию деликатная вставка деталей и прокладка кабелей, демонстрируют новые рубежи возможностей. В то же время интеллектуальная робототехника продвигается и в таких производственных процессах, как складская логистика и инспекционные процедуры, часто с использованием мобильных роботов или гибридных решений.

Эта волна инноваций отражает более широкую тенденцию: автоматизация находится на грани переломного момента. Значительные преимущества от её внедрения наблюдаются не только в отраслях с высокими объёмами и низкой вариативностью, но и в сферах с высокой вариативностью и низкими объёмами производства.

Наибольшую выгоду могут получить отрасли пищевой промышленности, обработки металлов, логистики и дискретного производства в целом. Большинство производственных компаний относятся к малым и средним предприятиям (SME), и они, так же как и крупные корпорации, могут существенно повысить эффективность. По мере снижения барьеров в виде высоких первоначальных инвестиций и общей стоимости владения потенциал трансформации для SME возрастёт многократно.

Первопроходцы: путь трансформации ранних пользователей

По мере того как робототехника меняет ландшафт промышленных опера-

ций, группа первопроходцев прокладывает новые пути и переопределяет границы возможного. Интегрируя интеллектуальные роботы в ранее изолированные функции, они закрывают последние пробелы автоматизации с помощью физического ИИ.

Эти компании не просто внедряют новые инструменты – они перестраивают рабочие процессы, добиваются новых уровней гибкости и точности, пересматривая организацию работы на производственных линиях и в крупных складах. Их пути трансформации дают ключевое видение того, как передовые возможности физического ИИ могут быть эффективно масштабированы, показывают необходимые организационные основы и технические компоненты для инновационного роста.

Приведённые далее примеры из реальной жизни демонстрируют, как первопроходцы преодолевают этот процесс трансформации. Это иллюстрация того, как будущее промышленных операций реализуется на практике.

E-commerce и автоматизация выполнения заказов

Компания Amazon управляет более чем 1 миллионом роботов по всей своей сети, что делает её крупнейшим пользователем робототехники в мире. Роботы работают в 300 центрах выполнения заказов, взаимодействуя с сотрудниками при выполнении повторяющихся операций, таких как сортировка, подъём и транспортировка посылок.

Прогресс компании в области роботизации отражает непрерывный путь экспериментов и инноваций, направленный на постоянное улучшение условий труда сотрудников и повышение качества обслуживания клиентов.

За последнее десятилетие Amazon внедрила серию последовательных «технологических прорывов», применяя физический ИИ по всей сети центров выполнения заказов:

- мобильные роботы «goods-to-person», доставляющие товары напрямую сотрудникам;
- системы сортировки на базе компьютерного зрения для оптимизации потоков товаров;
- мехатронные упаковочные линии, спроектированные для минимизации использования упаковочных материалов;

- роботизированные манипуляторы, способные захватывать большинство товаров из каталога.

Хотя эти решения повышали безопасность и производительность, они работали по отдельности. Главной задачей оставалась интеграция всех систем для достижения полноценной сквозной трансформации.

Amazon перестроила операционную систему своих центров выполнения заказов, опираясь на предиктивное планирование с использованием ИИ и обеспечение совместимости всех систем. Основу новой архитектуры составляют три ключевые технологии, объединяющие весь процесс выполнения заказов от приёма товаров до их отгрузки.

- **Sequoia** – автоматизированная система хранения и извлечения товаров.
- **Sparrow** – артикулированный манипулятор с продвинутым зрением и планированием движений на основе генеративного ИИ, способный идентифицировать, захватывать и размещать около 60% позиций из ассортимента компании, обучаясь на данных промышленного масштаба каждый день.
- **Proteus** – коллаборативный автономный мобильный робот, который в реальном времени строит карты открытых пространств, распознаёт действия людей и прокладывает эффективные и безопасные для персонала маршруты. Он перемещает поддоны с товарами, для чего ранее требовались ограждённые зоны.

Эта интеграция позволяет Amazon реализовать настоящий сквозной поток выполнения заказов, повышая безопасность. Применение физического ИИ позволяет роботам воспринимать и анализировать реальную среду и эффективно действовать в центрах обработки заказов, оставаясь при этом частью детерминированных систем управления, что необходимо для безопасной работы в масштабах предприятия.

Совместная работа этих систем открывает выполнение задач, которые роботы на основе правил не могли бы решить самостоятельно. Это снижает нагрузку на сотрудников при выполнении повторяющихся операций и распространяет автоматизацию на ранее неструктурированные участки процессов.

Ранние реализации, включая центры нового поколения в Шривпорте, Луи-

зиана, показали значительные результаты:

- повышение безопасности персонала на рабочем месте;
- создание на 30% большего числа высококвалифицированных рабочих мест на объекте;
- ускорение доставки клиентам на 25%;
- рост общей эффективности операций на 25%, что приводит к снижению затрат для покупателей.

Новая фундаментальная модель генеративного ИИ, координирующая движение всего мобильного роботизированного парка по сети центров выполнения заказов, дополнительно повышает эффективность перемещений на 10%.

Три ключевых элемента позволили Amazon масштабировать интеллектуальную робототехнику по всей глобальной сети.

1. Многолетние данные компьютерного зрения – обширный каталог изображений и траекторий движения из реального мира, обеспечивающий критически важное обучение для надёжных моделей физического ИИ.

2. Механизм обратной связи «сотрудник в центре» – сотрудники, работающие рядом с роботами, взаимодействуют с инженерными командами напрямую, обеспечивая интеграцию решений в рабочие процессы и минимизируя фрагментацию автоматизации.

3. Интегрированная разработка и внедрение – Amazon проектирует, производит и развёртывает робототехнические решения внутри компании. Совместная деятельность команд по аппаратному обеспечению, ИИ и складским операциям ускоряет циклы «создай–измерь–обучи» и повышает скорость внедрения.

В совокупности эти факторы: масштабные данные, совместная работа сотрудников и интегрированная цепочка разработки – позволили Amazon последовательно внедрить физический ИИ в крупнейшей в мире сети центров выполнения заказов.

Благодаря этим внедрениям выросла потребность в высококвалифицированных работниках, например инженерах по обслуживанию, на 30%. Компания реализовала программу Career Choice, предоставляющую поддержку в оплате обучения и возмещение расходов на учебные пособия и сборы за степени и сертификации, позволяющие сотрудникам осваивать востребован-

ные и высокооплачиваемые профессии. Кроме того, благодаря программам по мехатронике и робототехнике сотрудники могут развивать карьеру и претендовать на почасовую ставку, увеличенную до 40%.

Производство электроники

В ответ на рост затрат на рабочую силу и глобальную тенденцию к локализованному производству компания Foxconn продвигает концепцию «масштабируемой роботизированной рабочей силы на базе ИИ». Компания выделила трёхэтапный процесс создания AI-интегрированных фабрик:

- 1) проектирование с использованием цифрового двойника и симуляций;
- 2) сотрудничество человека и робота;
- 3) реализация фабрик с воплощённым интеллектом.

Эта поэтапная трансформация отражает более широкую амбицию Foxconn: не просто автоматизировать задачи, а выстроить интеллектуальную производственную экосистему, обеспечивающую более высокую ценность и масштабируемость операций в глобальной сети производства.

На этом пути Foxconn столкнулась с ограничениями традиционной робототехники на основе правил при выполнении прецизионных задач, таких как затяжка винтов и раскладка кабелей. Эти задачи требуют высокой точности, адаптивности и контроля усилия. Компания решила эти проблемы с помощью робототехники на базе ИИ и технологий цифрового двойника.

Foxconn использовала платформу Nvidia и AI-роботизированные руки с точной оценкой положения инструментов и планированием движений в реальном времени. Это обеспечило высокую точность и отсутствие коллизий, открыв две новые возможности для автоматизации:

- **затяжка винтов:** роботы с ИИ изучили оптимальные траектории движения и требуемое усилие затяжки с помощью обучения с подкреплением, что повысило стабильность, ускорило цикл работы и сократило количество брака;
- **вставка кабелей:** ранее эта операция не поддавалась автоматизации из-за сложности. Благодаря реальному контролю усилия и корректировке траектории движения робота теперь динамически адаптируют захват и позиционирование под вариативность деталей.

Виртуализация обучения и интеграция физического ИИ позволили быстро развернуть решения на нескольких площадках, создавая масштабируемый шаблон для будущих умных фабрик Foxconn.

Создание цифровых двойников производственных линий для быстрой виртуальной симуляции, тестирования и валидации сократило время развёртывания на 40%. Роботы с ИИ улучшили время цикла на 20–30%, снизили уровень ошибок на 25%. Виртуальная валидация устранила необходимость дорогостоящих экспериментов в реальной среде, снизив операционные расходы на 15%. Самонастраивающиеся усилие и траектория роботов обеспечили высокую точность и надёжность, что позволило добиться более низкого процента брака, чем у человека, в сложных сборочных задачах.

- **Технологии:** трансфер «симуляция-в-реальность» ускорил адаптацию моделей ИИ и снизил необходимость физических проб и ошибок, обеспечив масштабируемое внедрение.

- **Сотрудники:** инженеры прошли обучение по цифровым двойникам, программированию роботов с ИИ и инструментальным цепочкам Nvidia Omniverse. Они освоили виртуальное вводное тестирование, адаптивное управление и оптимизацию на основе данных, переходя к роли архитекторов AI-интегрированной автоматизации.

- **Партнёрства:** для совместной разработки масштабируемых стратегий автоматизации Foxconn сотрудничала с поставщиком инфраструктуры AI-робототехники Nvidia, а также с производственными экосистемными партнёрами (Fanuc, Techman), что стало ключевым фактором успеха трансформации.

Масштабирование: технологические платформы и партнёрства

Итак, для того чтобы интеллектуальная робототехника стала легко интегрируемой, масштабируемой и успешной на уровне всей экосистемы, ключевое значение приобретают новые технологические платформы физического ИИ и стратегические партнёрства.

Новый стек технологий физического ИИ

По мере приближения зрелости робототехники формируется новый стек

технологий физического ИИ, который принципиально отличается от традиционных роботизированных платформ. Этот стек включает пять уровней:

- 1) **приложения** – интерфейсы и инструменты для взаимодействия конечных пользователей с системой и её интеграции (API, коннекторы и интуитивные HMI для мониторинга и управления);
- 2) **симуляция и обучение** – виртуальная среда, инструменты и платформы данных для разработки и тестирования роботов. Используются генерация синтетических данных, высокоточные симуляторы и цифровые двойники, обеспечивающие точный переход «sim-to-real»;
- 3) **операционная система** – Robot Operating System (ROS) – фундамент стека для абстрагирования аппаратного обеспечения, координации процессов и коммуникации компонентов; управляет планированием задач и интегрирует фреймворки, обеспечивая стандартизацию и совместимость;
- 4) **Edge-AI** – процессоры на устройстве для выполнения ИИ-обработки и объединения данных с датчиков в реальном времени позволяют автономно принимать решения с минимальной задержкой и без зависимости от облака;
- 5) **роботизированное аппаратное обеспечение** – механическая основа (актуаторы, контроллеры и системы сенсоров/зрения), обеспечивающая способность робота действовать, ощущать и воспринимать окружающую среду.

Такой многоуровневый подход позволяет создавать гибкие, интегрированные и масштабируемые решения физического ИИ, способные ускорять автоматизацию и расширять её применение в различных отраслях.

Новые игроки и трансформация экосистемы

В экосистему интеллектуальной робототехники, дополняя традиционных производителей, вступают новые участники – от стартапов с приоритетом на ИИ, таких как Sereact и Covariant, до технологических гигантов, включая Nvidia, Tesla, Apple и Google.

Ключевым местом приложения усилий по инновациям остаётся слой симуляции и обучения. Высокоточные модели мира, кинематические и физи-

чески корректные фотореалистичные симуляции (в зависимости от области применения), а также генерация синтетических данных позволяют создавать и внедрять надёжные навыки ИИ. Некоторые стартапы, работающие исключительно с программным обеспечением, используют для расширения возможностей своих решений существующее оборудование (Covariant, Intrinsic). Параллельно появляются вертикально интегрированные компании, предлагающие решения по всему технологическому стеку (Neura, Figure, Tesla, Boston Dynamics). В большинстве случаев их инновации сосредоточены на контекстно-ориентированной робототехнике с использованием гуманоидной формы.

Независимо от того, применяют ли компании модульный подход или вертикально интегрированное решение в рамках многоуровневого стека, масштабируемые решения требуют бесшовной интеграции технологического стека ИИ в существующую производственную среду. Сегодня производители опираются на сложную цепочку промышленного программного обеспечения, которая собирает и интегрирует данные о продуктах и процессах из различных источников, обеспечивая системный интеллект и взаимодействие с соседним автоматизированным оборудованием.

Помимо традиционных интеграторов, на рынок выходят новые поставщики услуг Robots-as-a-Service (RaaS). Это расширяет доступность технологий и снижает барьер для компаний, не обладающих внутренними ресурсами для самостоятельного внедрения.

Стратегические партнёрства – ключ к успеху

В быстро развивающемся мире интеллектуальной робототехники для производителей, стремящихся использовать передовые разработки, стратегические партнёрства становятся важнейшим инструментом.

Ни одна компания не способна самостоятельно развивать все необходимые возможности с той скоростью и эффективностью, с которой прогрессирует технология. Особенно остро эта проблема стоит для малых предприятий, которым не хватает ресурсов для самостоятельного создания всех компетенций. Наиболее успешные компании выбирают правильных партнёров для совместной работы.

Сотрудничество с поставщиками технологий, научно-исследовательскими институтами и коллегами внутри и между отраслями позволяет производителям оставаться на переднем крае инноваций, используя коллективный опыт.

Например, автопроизводитель может совместно с AI-стартапом разрабатывать роботизированную сборочную линию, одновременно работая с университетской лабораторией по робототехнике над новыми методами манипуляции.

Такой подход помогает компаниям идти в ногу с быстрыми технологическими изменениями, используя специализированные знания партнёров в области ИИ, сенсоров и программного обеспечения. Он также снижает риски интеграции: когда производители роботов, разработчики ИИ и инженеры фабрики изначально планируют решения вместе, они заранее выявляют и решают вопросы совместимости, обеспечивая более плавное развёртывание.

Партнёрства также создают возможность совместного проектирования решений, адаптированных под реальные операционные потребности. Производители могут направлять интеграторов и поставщиков оборудования, уточняя, что необходимо на производственной площадке, а взамен получать высокоадаптированные роботизированные системы, которые никто не смог бы создать в одиночку.

Итак, помимо технических инноваций, сотрудничество открывает новые рынки и возможности, позволяет делить риски и инвестиции, а также заранее согласовывать решения с регуляторами и стандартами. В итоге развитие стека технологий физического ИИ – это не только новые технологии, но и новые отношения и экосистемы. В такой среде вертикально интегрированные компании по производству роботов работают вместе со специалистами по компонентам, а конечные пользователи тесно взаимодействуют с инноваторами.

Принятие этой философии партнёрства и экосистемного подхода позволяет производителям успешно встраиваться в новую эру интеллектуальной робототехники: оставаться гибкими, совместно распределять инвестиции, выгоды и риски, а также совместно создавать следующее поколение промышленной автоматизации.

Сдвиг в навыках и ролях

Роботизация должна рассматриваться не только как инструмент краткосрочного снижения затрат, но и как стратегический драйвер долгосрочного совершенства. Ключ к успеху – это люди, обладающие необходимыми навыками для эффективного управления и взаимодействия с интеллектуальными роботизированными системами.

Эта трансформация требует чёткой «картины целей» автоматизации, охватывающей все применения робототехники, а также детального плана реализации, включающего долгосрочное развитие новых качеств рабочей силы. Стратегическое внедрение интеллектуальной робототехники позволяет адаптироваться к изменчивым условиям, снижать операционные ошибки и поддерживать эффективность даже при дефиците работников или нарушениях в цепочке поставок.

Одним из наиболее немедленных и ощутимых эффектов является повышение безопасности на рабочем месте: роботы берут на себя задачи, связанные с подъёмом тяжестей, повторяющимися движениями или работой в опасных условиях – частыми причинами травм. На уже рассмотренных объектах Amazon, где интегрированы роботизированные системы, наблюдается снижение числа инцидентов на 15%, поскольку сотрудники переходят на роли, ориентированные на контроль, диагностику и непрерывное улучшение процессов.

Кроме того, человекоцентричный дизайн систем позволяет сотрудникам, используя свои когнитивные способности, занимать более безопасные и удовлетворяющие их роли. Например, решения robust.AI разрабатывают интуитивных и поддерживающих коллег роботов, уменьшая сложность процессов и улучшая сотрудничество с персоналом на производственном участке.

Этот технологический скачок перепределяет роль человека в промышленной среде. По мере того как физический ИИ автоматизирует ручные задачи, некоторые традиционные должности могут исчезнуть. Согласно Future of Jobs Report 2025 Всемирного экономического форума, роботы и автономные системы к 2030 году станут ведущим фактором сокращения рабочих мест. Однако это сокращение – не исчезновение рабочих мест, а их трансформация. Появляются новые квали-

фицированные роли, ориентированные на надзор за интеллектуальными системами, решение нестандартных ситуаций и оптимизацию производительности автоматизированных процессов.

Сдвиг в задачах и навыках хорошо иллюстрируется на примере развивающегося ландшафта ролей (рис. 4):

- **Операторы машин** превращаются в техников по роботам, супервайзеров автоматизации и тренеров ИИ-систем.
- **Работники логистики** становятся координаторами мобильных роботизированных парков.
- **Специалисты по контролю качества** переходят к роли инспекторов с поддержкой ИИ, интерпретируя алгоритмические результаты вместо ручной проверки каждой позиции.
- **Команды технического обслуживания** смещают фокус с реактивного ремонта на предиктивную диагностику, опираясь на данные сенсоров и прогнозы ИИ.
- **Инженеры производства** меняют задачи с проектирования и обслуживания систем на оптимизацию адаптивных, управляемых ИИ роботизированных решений.

По мере того как роли, связанные с роботами, приобретают стратегическое значение, компании с выделенными робототехническими командами будут находиться на переднем крае этой революции. Лидеры перестанут ограничиваться управлением результатом через труд и оптимизацию процессов и начнут встраивать робототехнику с ИИ в бизнес-модель.

Эти изменения отражают более широкую трансформацию ролей рабочей силы. Будущая рабочая сила будет акцентировать внимание:

- **на принятие решений и управление по исключениям:** внесение нюансированных решений при сбоях роботов;
- **интерпретацию данных и принятие решений:** анализ системной аналитики для управления операциями и улучшениями;
- **непрерывное совершенствование и оптимизацию систем:** выявление возможностей для повышения эффективности рабочих процессов с поддержкой ИИ.

Новые приоритеты рабочей силы

Успех в эпоху роботизации зависит от бесшовного междисциплинарного

сотрудничества между инженерными, IT-, операционными и другими функциями, а также от культуры непрерывного обучения, которая позволяет поддерживать актуальность навыков для каждой роли.

Для раскрытия потенциала лидерам необходимо усилить способности к управлению изменениями, направлять переходы и внедрять культуру постоянного улучшения, обучения и адаптивности.

В эпоху интеллектуальной робототехники трансформация технологий невозможна без трансформации людей. Стратегическое планирование рабочей силы важно не только для получения операционной выгоды, но и для долгосрочной экономической и социальной устойчивости.

Чёткая «картина целей автоматизации» и видение будущих ролей, задач и требуемых навыков должны служить ориентиром для структурированных и непрерывных программ повышения квалификации и переквалификации, формируя промышленную рабочую силу будущего.

В ответ на эти изменения Всемирный экономический форум инициировал проект Human-Machine Collaboration, направленный на переосмысление синергии человека и машины и создание модели, которая поддерживает переход рабочей силы через сопоставление навыков и стратегий управления талантами. Главная цель инициативы – обеспечить центральную роль людей в трансформациях, вызванных передовыми технологиями.

Заключение: время действовать

Революция в робототехнике уже не на горизонте – она происходит прямо сейчас. Для ведущих производителей интеллектуальная робототехника перестала быть экспериментом и стала краеугольным камнем операционного совершенства и гибкости.

То, что казалось невозможным из-за технологической сложности или экономических ограничений, теперь становится реализуемым благодаря стремительному развитию физического ИИ, симуляционных сред и дизайна роботизированных систем. Целевое состояние предусматривает многоуровневую стратегию автоматизации, в которой сосуществуют роботы с правило-ориентированным, обучаемым и контекстно-ориентированным поведением.

	Прямое производство	Косвенное производство			
	Производство, сборка и упаковка	Производственная инженерия	Логистика	Контроль качества	Сервисное обслуживание
Сегодня 	Операторы вручную обрабатывают и собирают детали. Эти работы требуют точности, ручного управления станками и полной концентрации внимания	Инженеры проектируют, внедряют и оптимизируют производственные системы, в основном опираясь на опыт. Обновление автоматизации требует больших усилий	Работники вручную перемещают материалы с помощью погрузчиков или тележек. Это приводит к неэффективности, авариям и ошибкам в размещении	Продукция проходит визуальный контроль сотрудниками. Этот процесс медленный, субъективный и подвержен утомляемости человека. Следствие – пропуск дефектов	Плановые графики технического обслуживания не учитывают реальное состояние оборудования. Это затрудняет выявление и прогнозирование проблем
В будущем 	Сценарии				
	Роботы с поддержкой ИИ действуют, используя обратную связь системы в реальном времени. Системы автоматически адаптируются к разным задачам	Производственные системы являются интеллектуальными и адаптивными. Используется контроль качества на основе компьютерного зрения	Автономные мобильные роботы на базе ИИ выполняют полный цикл обработки материалов, обеспечивая их своевременную доставку	Роботизированные манипуляторы с системой компьютерного зрения проводят автоматизированные испытания на качество	Системы на базе ИИ становятся автономными: роботы выполняют часть задач по техническому обслуживанию и инспекции
	Задачи				
	– Контролировать роботизированные рабочие процессы – Обучать роботов – Разрешать коллизии	– Оптимизировать процессы – Проектировать процессы – Интегрировать процессы	– Мониторинг парка роботов – Перенастройка маршрутов роботов – Управление системой тревог	– Стратегический надзор – Контроль дефектности – Оптимизация контроля качества	– Сложный ремонт – Интерпретация данных – Совершенствование системы
	Компетенции				
	– Системное мышление – Цифровая грамотность – Программирование/обучение роботов	– Продвинутые цифровые и ИИ навыки – Системное мышление – Креативность	– Системное мышление – Цифровая грамотность – Проектирование рабочих процессов	– Аналитическое мышление – ИИ и работа с большими данными – Креативность	– Технические навыки – Аналитическое мышление – ИИ и работа с большими данными

Рис. 4. Physical AI высвобождает людей для задач более высокого уровня

ем. Это обеспечивает системный интеллект и создаёт основу для будущего роста. По мере ускорения интеграции робототехника перестает быть нишевой возможностью и становится стратегическим конкурентным преимуществом.

Технологии должны быть интегрированы, а не изолированы. Для раскрытия всего потенциала интеллектуальной робототехники необходима надёжная технологическая инфраструктура, объединяющая отдельные решения и поддерживающая их совместную работу. Формируется новый стек технологий ИИ, который для обеспечения системного интеллекта на уровне предприятия должен быть бесшовно интегрирован в существующую промыш-

ленную программную цепочку. Достижение такого уровня интеграции невозможно в одиночку: успех зависит от создания сильных коллаборативных экосистем, которые позволят масштабировать интеллектуальную робототехнику, а не ограничиваться изолированными внедрениями.

Трансформацию должны вести люди. Для согласования внедрения робототехники с вариативностью операций, производственными моделями и долгосрочным развитием рабочей силы необходимо стратегическое видение. Производители должны смотреть поверх отдельных эпизодов автоматизации, рассматривая их не просто как инструмент краткосрочного сокращения затрат, а как катализатор создания дол-

госрочной ценности. По мере изменения рабочих ролей критически важны программы повышения квалификации и переквалификации, чтобы сотрудники могли контролировать, оптимизировать и расширять возможности интеллектуальных систем. Только человекоориентированный подход позволяет внедрять робототехнику устойчиво и инклюзивно, вписывая её в ДНК компании.

Производители должны вести, а не следовать. Те, кто откладывают действия, рискуют упустить волну быстро сливающихся технологических и экономических факторов. Те, кто действуют решительно, не только откроют новые возможности, но и сформируют будущее промышленных операций. ●