

Научная статья

УДК 338.4, 338.012, 338.364

JEL: O14, O33, L63

<https://doi.org/10.18184/2079-4665.2025.16.3.398-416>

Синергия промышленной робототехники и информационно-коммуникационных технологий

Дубинина Марина Геннадьевна¹, Дубинина Виктория Васильевна²

^{1,2}Центральный экономико-математический институт Российской академии наук; Москва, Россия

¹mgdub@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4578-668X>

²vDubinina07@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2785-1599>

Аннотация

Цель представленного исследования – доказательство взаимосвязи и взаимовлияния между распространением промышленной робототехники и цифровыми технологиями, их синергии.

Методы. В работе используются модифицированные модели диффузии инноваций, примененные для описания динамики плотности роботизации на примере ряда стран (Китая, Южной Кореи и Японии) с учетом диффузии передовых цифровых технологий (технологий 5G, интернета вещей, межмашинного взаимодействия, облачных сервисов и др.) на предприятиях. Кроме того, с помощью регрессионных зависимостей исследуется влияние распространения промышленных роботов в электронной промышленности этих стран на экономические показатели отрасли.

Результаты работы. Учет развития и внедрения цифровых технологий на предприятиях в модели диффузии плотности роботизации для ряда стран дал лучшее приближение к исходным данным, чем базовая логистическая модель. Использование такой модифицированной модели позволило построить прогноз плотности роботизации в странах в зависимости от сценариев диффузии цифровых технологий. С помощью регрессионных моделей оценен эффект внедрения промышленных роботов на производство полупроводников, сенсоров и коммуникационного оборудования на примере Японии, что подтверждает наличие синергии между передовыми цифровыми технологиями и промышленной робототехники.

Выводы. Результаты проведенного исследования подтверждают наличие большого взаимного влияния, синергии цифровых технологий и робототехники. Передовые информационно-коммуникационные технологии повышают степень распространения роботизации в развитых странах, переводят на более высокий уровень взаимодействие человека и робота, открывают новые способы использования промышленных роботов на умном производстве. В то же время, широкое применение промышленной робототехники в электронной промышленности, при производстве коммуникационного оборудования, полупроводников и печатных плат, повышает качество и эффективность, обеспечивает надежность и масштабируемость производства.

Ключевые слова: плотность роботизации, технологии межмашинного взаимодействия, 5G, Интернет вещей, облачные вычисления

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Дубинина М. Г., Дубинина В. В. Синергия промышленной робототехники и информационно-коммуникационных технологий // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2025. Т. 16. № 3. С. 398–416

EDN: <https://elibrary.ru/ahgkft>. <https://doi.org/10.18184/2079-4665.2025.16.3.398-416>

© Дубинина М. Г., Дубинина В. В., 2025



Synergy of industrial robotics and information and communication technologies

Marina G. Dubinina¹, Victoria V. Dubinina²

^{1,2}Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia

¹mgdub@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4578-668X>

²vdubinina07@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2785-1599>

Abstract

Purpose: is to prove the relationship and mutual influence between the diffusion of industrial robotics and digital technologies, their synergy.

Methods: the paper uses modified models of innovations diffusion applied to describe the dynamics of robot density using the example of a number of countries (China, South Korea and Japan) taking into account the diffusion of advanced digital technologies (5G technologies, the Internet of Things, machine-to-machine interaction, cloud services, etc.) at enterprises. In addition, using regression dependencies, the influence of industrial robots spread in the electronics industry of these countries on the economic indicators of the industry is studied.

Results: studying the development and implementation of digital technologies at enterprises in the model of diffusion of robot density for a number of countries gave a better approximation to the original data than the basic logistic model. The use of such a modified model made it possible to forecast the robot density in countries depending on the scenarios of digital technology diffusion. Using regression models, the effect of introducing industrial robots in semiconductors, sensors and communication equipment production was estimated using the example of Japan, which confirms the presence of synergy between advanced digital technologies and industrial robotics.

Conclusions and Relevance: the results of the study confirm the presence of a large mutual influence, synergy of digital technologies and robotics. Advanced information and communication technologies increase the degree of robotization in developed countries, transfer human-robot interaction to a higher level, and open up new ways of using industrial robots in smart manufacturing. At the same time, the widespread use of industrial robotics in the electronics industry, in the production of communication equipment, semiconductors and printed circuit boards improves quality and efficiency, ensures the reliability and scalability of production.

Keywords: robot density, machine-to-machine interaction technologies, 5G, Internet of Things, cloud computing

Conflict of interest. The authors declare that there is no Conflict of Interest.

For citation: Dubinina M. G., Dubinina V. V. Synergy of industrial robotics and information and communication technologies. *MIR (Modernization. Innovation. Research)*. 2025; 16(3):398–416. (In Russ.)

EDN: <https://elibrary.ru/ahgkft>. <https://doi.org/10.18184/2079-4665.2025.16.3.398-416>

© Dubinina M. G., Dubinina V. V., 2025

Введение

В настоящее время происходит глубокая трансформация промышленного производства, характеризующаяся повышенным распространением автоматизации и цифровизации. Промышленные роботы (ПР) играют ключевую роль в этом процессе, освобождая людей от выполнения повторяющихся задач и повышая их безопасность.

ПР представляют собой передовые технологии, которые объединяют механическую, электронную составляющие, беспроводную связь, искусственный интеллект и другие технологии, становясь значимым инструментом для продвижения цифровой трансформации и модернизации современных

заводов [1]. Растет количество производственных линий, на которых стационарные роботы сотрудничают с людьми или поддерживаются мобильными роботами для транспортировки материалов и товаров.

Робототехника десятилетиями использовалась в производстве электроники и вычислительной техники. Однако без технологий, предоставляемых этой отрасли, развитие ПР было бы невозможно. Поэтому они тесно взаимосвязаны. Современная производственная экосистема включает ПР, передовые сетевые устройства и передовые цифровые технологии (искусственный интеллект (ИИ), Интернет вещей (IoT) и аналитику больших данных). Процессы роботизации и автоматизации являются

важнейшими направлениями развития современной обрабатывающей промышленности (ОП).

Уровень внедрения ПР является одним из важных экономических показателей. Для межстранового сопоставления степени внедрения автоматизации в ОП используется показатель плотности роботизации (количество ПР на 10 тыс. занятых в ОП). Он отражает не только технический прогресс страны, но и ее способность использовать инновации для повышения эффективности и конкурентоспособности промышленности. По данным International Trade Administration, увеличение плотности роботизации на 1% увеличивает производительность на 0,8% во всех отраслях¹.

Технология 5G сократила задержку связи между машинами и устройствами на умной фабрике и является более надежной, чем предыдущие поколения сотовых сетей. Она также упростила перенастройку заводских цехов и добавление новых машин и оборудования, нашла применение в различных промышленных секторах, включая умные фабрики, промышленный IoT, дополненную и виртуальную реальность в производстве и предиктивное обслуживание.

Однако роботизация производства сопровождается и проблемами, связанными с надежностью подключения, развитием цифровой инфраструктуры, обеспечением безопасности для человека [2]. Несмотря на свои большие возможности, технология 5G, например, сталкивается также с проблемами обеспечения покрытия и безопасности соединений, емкости сети и устойчивости связи, что препятствует возможности полностью удовлетворить требования промышленной автоматизации. Кроме того, имеется ряд негативных факторов, влияющих на ее распространение: сигналы 5G в миллиметровом диапазоне блокируются зданиями, стенами, окнами, что приводит к необходимости установки множества малых сот с высокой плотностью [3].

Целью данного исследования является выявление механизмов взаимного влияния роботизации и цифровизации промышленного производства, их роли в экономическом развитии регионов и от-

раслей на примере ведущих стран Азии (Японии, Южной Кореи и Китая).

Ускоренное развитие роботизации и цифровизации производства особенно актуально для России в настоящее время, когда в качестве мер по обеспечению технологического суверенитета страны приняты в том числе национальные проекты «Средства производства и автоматизации», в который входит развитие промышленной робототехники и автоматизации производств², и «Экономика данных и цифровая трансформация государства», направленный на цифровую трансформацию государственного и муниципального управления, экономики и социальной сферы³.

Одним из результатов реализации проекта «Средства производства и автоматизации» должно стать вхождение России в число 25-ти ведущих стран мира по роботизации к 2030 г., при этом плотность роботизации в стране должна достигнуть показателя 145 роботов на 10 тыс. занятых⁴, тогда как на 2023 г. этот показатель, по разным оценкам, составлял 15–19 ед. Такой значительный ожидаемый рост плотности роботизации может быть достигнут только с помощью более широкого внедрения цифровых технологий в производство и развития собственной базы электронной промышленности. Электроника отнесена к числу 13-ти приоритетных отраслей промышленности, и ее развитие является одним из национальных проектов технологического лидерства. Как было подчеркнуто на Российском форуме «Микроэлектроника», «развитие отечественной робототехники в значительной степени определяется возможностями и уровнем технологического развития микроэлектроники»⁵.

Обзор литературы и исследований

Исследования по теме представленной работы развиваются в нескольких направлениях.

Первое направление связано с определением роли роботизации в современном производстве. С одной стороны, на макроуровне изучается влияние роботизации на эффективность производства, производительность труда и занятость в промышленности (см., например, [4–7]). По мнению мно-

¹ The importance of 5G for manufacturing robots // PHP Resource Center. 08.05.2024. URL: <https://www.php.cn/faq/780676.html> (дата обращения: 24.02.2025).

² Национальный проект «Экономика данных и цифровая трансформация государства» // Правительство России. URL: <http://government.ru/rugovclassifier/928/events/> (дата обращения: 03.03.2025).

³ Национальный проект «Экономика данных и цифровая трансформация государства» // Правительство России. URL: <http://government.ru/rugovclassifier/923/events/> (дата обращения: 03.03.2025).

⁴ Манукиян Е. В. Нацпроект по автоматизации производств войдут три федеральных проекта // Российская газета. 11.06.2024. URL: <https://rg.ru/2024/06/11/v-nacproekt-po-avtomatizacii-proizvodstv-vojdut-tri-federalnyh-proekta.html> (дата обращения: 18.03.2025).

⁵ Итоги. Микроэлектроника 2024 // Консорциум робототехники. URL: <https://robot-control.ru/tpost/alse3i33g1-itogi-mikroelektronika-2024> (дата обращения: 18.03.2025).

гих авторов, уровень внедрения робототехники является ключевым показателем того, как технологические возможности страны меняются с течением времени. В работе [8] на основе отраслевых панельных данных для 9-ти стран выявлено, что более интенсивное использование ПР оказывает значительное положительное влияние на общую факторную производительность (TFP): увеличение на одно стандартное отклонение плотности роботизации приводит к увеличению TFP более чем на 6%. При этом автоматизация связана с более высокой заработной платой и неизменной или более высокой занятостью. В статье [9] отмечается, что робототехника не только автоматизировала повторяющиеся задачи, но и позволила настраивать производственные процессы и ускорять циклы инноваций, положительно повлияла на динамику рабочей силы за счет повышения квалификации сотрудников и создания новых возможностей в высокотехнологичных отраслях.

С другой стороны, исследуется влияние роботизации на микроуровне. В статье [10] проводится анализ того, как ПР влияли на объем продаж, производительность и прибыль в компаниях различных отраслей на примере 6-ти европейских стран в период с 2004 по 2013 гг. Авторы выявили, что отрасли с более высокой степенью роботизации характеризуются более высокими темпами роста производительности труда и общей прибыли для фирм, которые изначально имели высокую производительность и рентабельность соответственно. Для других же фирм отрасли наблюдалась незначительная или даже отрицательная корреляция между роботизацией и ростом производительности труда.

Второе направление исследований связано с интеграцией ПР и цифровых технологий. В работе [11] подчеркивается важность применения ИИ в промышленной робототехнике для перехода от «традиционного производства» к «интеллектуальному», для кардинальной трансформации экономики. В статье [12] утверждается, что конвергенция облачных и периферийных вычислений, ИИ и технологии 5G/6G прокладывают путь к новой эре интеллектуальных роботов, способных ориентироваться в окружающей среде и адаптироваться к изменяющимся условиям. Основное влияние новых коммуникационных технологий на ПР заключается в том, что их контроллеры имеют все большее количество подключений, функций и протоколов для связи с другими «умными» устройствами.

Широкое распространение коллаборативных роботов, тесно взаимодействующих с людьми на производстве, ставит проблему обеспечения безопасности в совместном рабочем пространстве. Как указывается в работе [13], для преодоления

технических и психологических барьеров необходимо активное внедрение решений на основе ИИ, проектирование объектов с учетом использования роботов, создание условий для безопасного сотрудничества робота и человека. И эта безопасность может быть обеспечена взаимодействием роботизации с передовыми информационно-коммуникационными технологиями (ИКТ). Одной из главных проблем компаний, пытающихся внедрить роботов, является выявление ключевых технологий, способствующих более широкому использованию ПР [14].

Системы 5G с надежным управлением и каналами данных, более быстрыми механизмами обратной связи могут достигать очень низких задержек сигнала, что необходимо для безопасности рабочего пространства [15].

В то же время, при разработке высокоавтоматизированных систем большая часть оборудования связана через IoT или другие коммуникационные технологии. Поэтому необходимо учитывать кибербезопасность и защиту конфиденциальности процессов, используемых для мониторинга и управления данными. По мнению авторов работы [16], технологии IoT еще не полностью раскрыли свой потенциал для управления и оптимизации производства; эти технологии в настоящее время, вероятно, находятся на начальной стадии развития.

Третье направление исследований связано с моделированием диффузии передовых технологий с помощью S-образных кривых. Наиболее распространенными моделями этого типа являются:

- логистическая модель, или модель Перла-Рида [17]:

$$Y = \frac{L}{1+be^{-kt}}, \quad (1)$$

- модель Гомпертца [18]:

$$Y = Le^{be^{-kt}}, \quad (2)$$

где Y – уровень распространения передовой технологии (обычно доля принявших передовую технологию в общем количестве участников процесса), L – верхний предел ее распространения; b и k – параметры кривой, обычно полагаемые постоянными на всем периоде исследования; t – период времени.

Одно из первых исследований, связанных с распространением роботов, было описано в работе [19], где строились прогнозы диффузии робототехники в штате Нью-Йорк до 2015 г. на основе модели Мэнсфилда-Басса:

$$\frac{dY(t+1)}{dt} = (p(t) + q(t) * Y(t))(M - Y(t)). \quad (3)$$

Позднее модели S-кривых и их модификации применялись для прогнозирования диффузии мобильных телефонов [20, 21], распространения интернета [22], технологий мобильной связи [23], сотовой связи по регионам России [24] и многих др.

Однако все перечисленные исследования затрагивали какую-то одну из проблем взаимодействия роботизации и цифровых технологий и не анализировали их взаимное влияние.

Материалы и методы

Методология данного исследования основана на изучении влияния распространения ИКТ на плотность роботизации в странах Азии, где на предприятиях широко внедряются сети 5G и другие передовые цифровые технологии: IoT, технологии межмашинного взаимодействия, облачные сервисы и др. Исследуется взаимосвязь между распространением ПР и цифровых технологий в Южной Корее, Китае и Японии на основе данных Международной Федерации Робототехники (IFR), Организации экономического сотрудничества и развития (OECD), Мирового Банка (World Bank) и Международного союза электросвязи (ITU).

Выбор этих стран для исследования обусловлен тем, что они являются лидерами как в области робототехники, так и в развитии цифровых технологий, а сам регион стран Азии с 2019 г. опережает другие регионы мира по плотности роботизации. Японская робототехническая промышленность является движущей силой не только внутренней, но и мировой экономики. Китай, Тайвань и Южная Корея являются основными мировыми производителями электронных компонент. Доминирование региона в производстве электроники и автомобилей требует передовых робототехнических решений для сборки, сварки и обработки материалов. Внедрение робототехники в этих странах поддерживается государственными программами и инвестициями частного сектора⁶.

Проблемой многих азиатских стран является старение населения, сокращение доли занятых на производстве, и автоматизация помогает компенсировать замедление роста рабочей силы физическим капиталом. Проблема нехватки рабочей силы, особенно в промышленности, актуальна и для России, где доля занятых по данным WB сократилась с 33,4% в 1991 г. до 26,4% в 2023 г.

Динамика плотности роботизации в рассматриваемых странах согласуется с теорией диффузии ин-

новаций, по которой распространение нововведения проходит несколько фаз своего развития.

Для описания распространения передовых технологий используются базовые S-образные кривые (логистическая, кривая Гомперца, модель Басса и ряд других). В данном исследовании разработаны модифицированные модели диффузии инноваций, которые учитывают распространение передовых цифровых технологий (технологий 5G, IoT, межмашинного взаимодействия, облачных сервисов и др.) на предприятиях рассматриваемых стран.

Кроме того, с помощью регрессионных моделей исследуется влияние распространения ПР в электронной промышленности на экономические показатели отрасли (на примере Японии).

Результаты исследования

Программы развития робототехники в Японии, Южной Корее и Китае

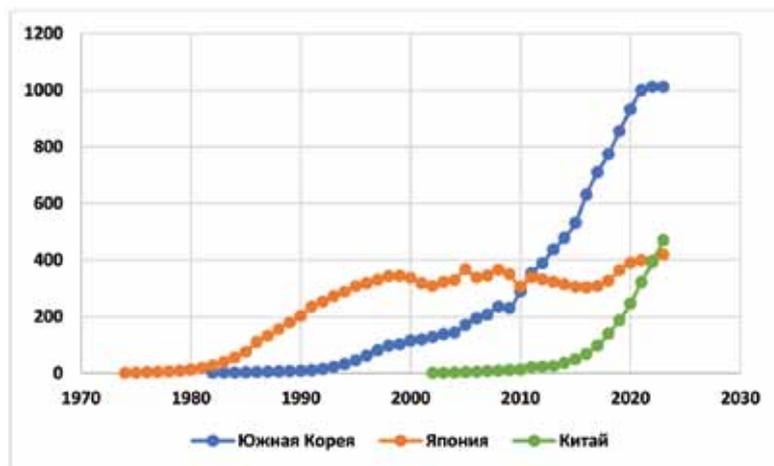
В Японии внедрение ПР в производство началось раньше, чем в Южной Корее и Китае, и раньше достигло стадии насыщения. Однако в последние годы начался новый рост этого показателя (рис. 1). Южная Корея, по всей видимости, в настоящее время переходит в стадию насыщения ПР, тогда как в Китае продолжается экспоненциальный рост плотности роботизации. Таким образом, исследуемые страны находятся на разных стадиях развития процесса роботизации, что позволяет распространить полученные результаты на другие страны и регионы.

Цифровые технологии оказывают существенное влияние на развитие промышленной роботизации. В Южной Корее, Японии и Китае правительства стран особое внимание уделяют как программам развития робототехники, так и цифровизации всех сторон общественной и экономической жизни.

Так, в Южной Корее поставлена цель достичь мирового технологического лидерства в робототехнике. Страна фокусируется на разработке ключевых технологий, которые будут поддерживать робототехнику, а также другие высокотехнологичные отрасли (космос и авиацию). Правительство планирует увеличить стоимость внутреннего рынка роботов в 3,5 раза (до более чем 15 млрд долл. к 2030 г.)⁷. Это должно быть достигнуто за счет сочетания государственных инвестиций, продвижения стартапов и укрепления ключевых технологий, в том числе цифровых.

⁶ Asia-Pacific Industrial Robots Market Size, Share & Trends Analysis Report // Straits Research. URL: <https://straitresearch.com/report/industrial-robots-market/asia-pacific> (дата обращения: 29.04.2025).

⁷ South Korea plans comprehensive robot integration into industry and society - \$2.2 billion for robot technology by 2030 // Xpert Digital. 22.10.2024. URL: <https://xpert.digital/en/robot-technology-south-korea/> (дата обращения: 14.03.2025).



Составлено авторами по материалам: International Federation of Robotics Statistics // IFR. URL: <https://ifr.org/> (дата обращения: 29.04.2025)

Рис. 1. Динамика плотности роботизации по странам

Compiled by the authors based on: International Federation of Robotics Statistics // IFR. URL: <https://ifr.org/> (accessed: 29.04.2025)

Fig. 1. Dynamics of robot density by country

ОП Южной Кореи, составляющая значительную часть ВВП (24,3% в 2023 г.)⁸, обеспечивает благоприятную среду для инноваций и технологических достижений в секторе робототехники. Многие ведущие корейские компании (Samsung, LG Electronics, SK и KT) вложили значительные средства в ИИ. Согласно принятой в 2022 г. Цифровой стратегии Южной Кореи, правительство страны инвестирует 1 млрд долл. в исследования основных технологий ИИ и полупроводников⁹. Разрабатывается облачная система ARC (AI, Robot, Cloud), которая служит испытательным полигоном для робототехники, ИИ и облачных технологий.

Согласно данным опроса¹⁰, в цифровой промышленности Южной Кореи в 2022 г. более 46% предприятий использовало или разрабатывало технологии ИИ, 44,5% – анализ больших данных, 30,3% – облачные вычисления, 20,3% – виртуальную и дополненную реальность, 16,2% – IoT.

Корейское агентство по содействию развития робототехнической промышленности за последние

3 года развернуло 716 роботов в 352-х компаниях автомобильной, электротехнической, электронной и текстильной промышленности в рамках ведущих проектов. В результате производительность выросла на 60,4%, а уровень дефектов снизился на 58,7%¹¹.

Аналогично, правительство Китая поставило целью достичь мирового лидерства в разработке, производстве и использовании робототехники. Для этого предполагается содействовать созданию национального центра больших данных промышленного интернета, переходу к интеллектуальному производству. Благодаря новым цифровым технологиям (ИИ, виртуальная реальность и 5G) Китай расширяет области применения своей робототехники. На 2022 г. ПР применялись в 52-х отраслевых категориях, включая автомобилестроение и электронику¹².

Китай также является крупным производителем электронных устройств, аккумуляторов, полупроводников и микрочипов. С 2016 г. электротехническая и электронная промышленность Китая стала

⁸ World Bank Indicators // World Bank Group. URL: <https://data.worldbank.org/indicator> (дата обращения: 16.03.2025).

⁹ Korea – Digital Economy // The International Trade Administration. URL: <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/korea-digital-economy> (дата обращения: 14.03.2025).

¹⁰ 디지털 신기술 개발 현황 // ITSTAT. URL: https://www.itstat.go.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=006&tblId=DT_127021_D009&conn_path=13 (дата обращения: 18.03.2025).

¹¹ Korea has the world's highest robot density // Maeil Business Newspaper. URL: <https://www.mk.co.kr/en/culture/11204070> (дата обращения: 17.03.2025).

¹² Robust Development in China's Robotics Industry // OpenGov Asia. URL: <https://opengovasia.com/2022/02/01/robust-development-in-chinas-robotics-industry/> (дата обращения: 14.03.2025).

основным заказчиком и драйвером роста ПР, опередив автомобильную промышленность¹³.

Автоматизация и робототехника (в том числе разработка коллаборативных роботов) имеют решающее значение для производственного сектора Японии и ее экономического роста. Правительство страны разработало инициативу Society 5.0, направленную на создание общества с высокой степенью конвергенции между киберпространством (виртуальным пространством) и физическим пространством (реальным пространством). Эта инициатива включает в себя инвестиции в ИИ, большие данные и IoT, интеграцию цифровых технологий и робототехники для создания общества, ориентированного на человека и решающего социальные проблемы. Кроме того, в настоящее время в Японии принята «Программа исследований и разработок Moonshot», одной из целей которой является создание к 2050 г. роботов с ИИ¹⁴. Роботы с ИИ и бесконтактные системы доставки – два примера технологий, разрабатываемых для максимизации производительности и услуг в стране.

Анализ влияния цифровых технологий на роботизацию промышленности

Передовые технологии мобильной связи, особенно широкое внедрение сетей 5G, открывают новые возможности в области робототехники благодаря высокой скорости передачи данных и низким задержкам сигнала. В качестве примера можно привести компанию BMW, на заводах которой для управления роботами и другими машинами используется сеть 5G, играющая ключевую роль в использовании облачного логистического решения. Это помогло BMW сократить время производства и повысить качество¹⁵. Филиал компании BMW Brilliance Automotive (BBA) в Китае стал первым производителем автомобилей, который обеспечил полное покрытие беспроводной связью 5G на всех своих заводах. Это стало возможным благодаря сотрудничеству BBA с телекоммуникационными компаниями China Unicom и China Mobile, обеспечившими скорость передачи данных 1 Гбит/с¹⁶.

Существуют и другие стандарты беспроводной связи, однако они имеют свои ограничения. Важной технологией в IoT является беспроводная технология LoRa, обеспечивающая связь на большие расстояния (2–5 км) и обладающая низким энергопотреблением, но при этом ее скорость передачи данных составляет всего 50 Кбит/с [25].

В исследуемых странах существенно выросла доля пользователей технологии 5G: в Китае – с 1,2% в 2019 г. до 73,7% в 2023 г.; в Южной Корее – с 3,1% в 2019 г. до 19% в 2023 г., в Японии – с 2,3% в 2020 г. до 29,4% в 2023 г. (рассчитано по данным ведущих операторов стран). Однако не на всех предприятиях стран данная технология внедрена. Основным требованием для установки 5G в промышленных условиях является ее электромагнитная совместимость с оборудованием на месте, чтобы сигналы этой технологии мобильной связи не оказывали отрицательного влияния на производственные процессы¹⁷. Необходимо учитывать и расположение устройств (близость к серверу обеспечивает более быструю передачу данных, сокращает время приема-передачи информации) [26].

Технологии межмашинного взаимодействия (Machine to Machine, M2M) обеспечивают прямую коммуникацию и взаимодействие между устройствами без вмешательства человека, позволяя обмениваться информацией, принимать разумные решения и выполнять действия на основе полученных данных. В ОП связь M2M обеспечивает предиктивное обслуживание, когда можно предвидеть отказы оборудования на основе анализа данных и предпринимать корректирующие действия до возникновения каких-либо сбоев.

За период 2014–2023 гг. количество подключений M2M на 100 человек во многих странах с развитой робототехникой существенно выросло (рис. 2). Особенно значителен этот рост в Китае – в 52,3 раза за период, в Южной Корее показатель увеличился в 8,3 раза, в Японии – в 4,3 раза.

Объединение робототехники, IoT и облачных сервисов привело к созданию нового вида интерне-

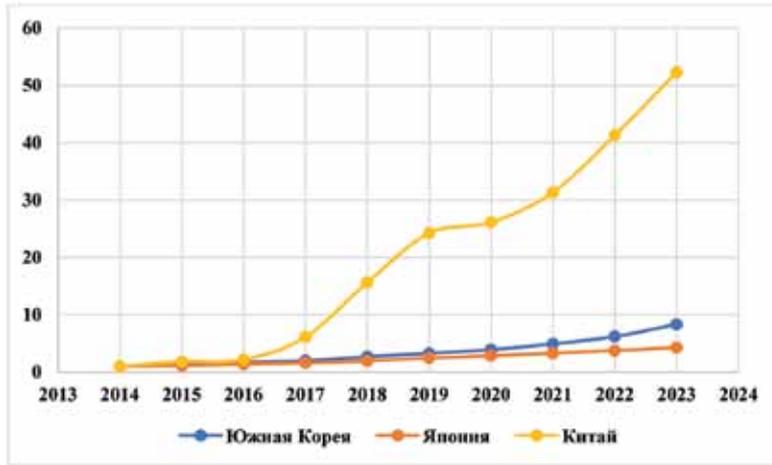
¹³ China's New Growth Strategy Backed by Robots // International Federation of Robotics. URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/chinas-new-growth-strategy-backed-by-robots> (дата обращения: 14.03.2025).

¹⁴ Moonshot Goal 3 // Moonshot. Research and Development Program. URL: <https://www.jst.go.jp/moonshot/en/program/goal3/index.html> (дата обращения: 21.02.2025).

¹⁵ Graser S. Intelligent connected factory with 5G technology: Autonomous logistics at BMW Group Plant Landshut calculates data in the cloud // BMW Group. 20.06.2022. URL: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0396773EN/intelligent-connected-factory-with-5g-technology:-autonomous-logistics-at-bmw-group-plant-landshut-calculates-data-in-the-cloud?language=en> (дата обращения: 21.02.2025).

¹⁶ 5G Mobile network goes live at all BMW Brilliance Automotive production sites in China // IoT Automotive News. URL: <https://iot-automotive.news/5g-mobile-network-goes-live-at-all-bmw-brilliance-automotive-production-sites-in-china/> (дата обращения: 21.02.2025).

¹⁷ 5G-Enabled Smart Manufacturing // 5G-Smart. URL: <https://5gsmart.eu/wp-content/uploads/2022-5G-SMART-Booklet.pdf> (дата обращения: 20.02.2025).



Рассчитано авторами по данным: Data Indicators // OECD. URL: <https://www.oecd.org/en/data/indicators.html?orderBy=mostRelevant&page=0>; Statistical Reports // China Internet Network Information Center. URL: <https://www.cnnic.com.cn/IDR/ReportDownloads/> (дата обращения: 01.03.2025)

Рис. 2. Коэффициент роста технологий межмашинного взаимодействия по странам, 2014 г. = 1

Calculated by the authors based on: Data Indicators. OECD. URL: <https://www.oecd.org/en/data/indicators.html?orderBy=mostRelevant&page=0>; Statistical Reports. China Internet Network Information Center. URL: <https://www.cnnic.com.cn/IDR/ReportDownloads/> (accessed: 01.03.2025) (In Eng.)

Fig. 2. Growth rate of machine-to-machine interaction technologies by country, 2014 = 1

та – Интернета роботизированных вещей (IoRT). В его архитектуре выделяют 5 уровней: уровень оборудования, состоящий из физических компонентов (роботы и их датчики); сетевой уровень – технологии, обеспечивающие подключения (WiFi, ZigBee и т.д.); уровень Интернета, реализуемый через различные энергоэффективные протоколы связи (например, Message Queuing Telemetry Transport, Internet Protocol); уровень инфраструктуры – платформы облачных вычислений и различные инструменты машинного обучения; уровень приложений, на котором конечный пользователь робота может увидеть желаемый результат внедрения IoRT¹⁸. Ведущие компании-производители ПР КУКА и ABB имеют собственные облачные платформы и центры обработки данных.

Беспроводная связь 5G и периферийные облачные вычисления – это две технологии, которые будут определять способы установки и применения ПР в будущем. Так, например, на экспериментальном стенде компаний ABB и Ericsson программное обеспечение, управляющее ПР, было перемещено с самих роботов на периферийную облачную платформу и подключено к ним через беспроводное соединение 5G. Это позволило освободить место в цехе, уменьшить количество кабелей, повысить гибкость перепроектирования производственного

цеха, увеличить количество используемых мобильных роботов [13].

Доля предприятий, использующих облачные вычисления, в Южной Корее и Японии в период 2012–2021 гг. выросла более чем в 2,5 раза (рис. 3).

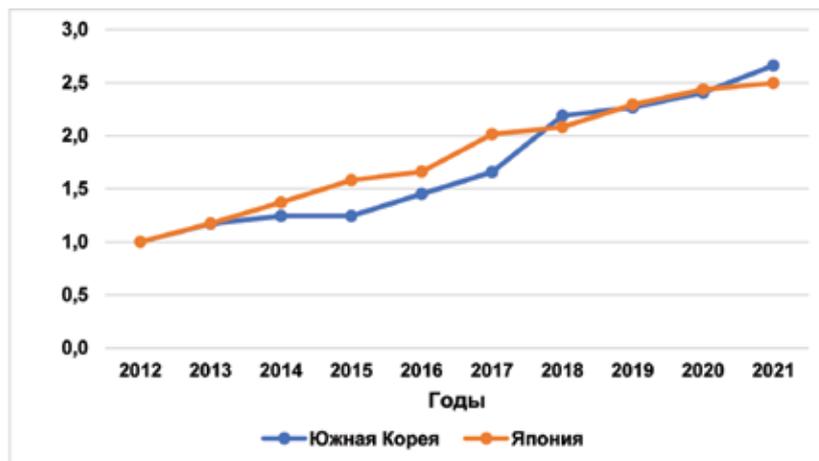
Для Южной Кореи, Китая и Японии с помощью эконометрического анализа в пакете STATISTICA были построены корреляционные зависимости между плотностью роботизации в ОП перечисленных стран и уровнем распространения в них цифровых технологий (табл. 1). Расчет производился по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}, \quad (4)$$

где x_i, y_i – уровни временных рядов в период i ; \bar{x}, \bar{y} – средние значения показателей.

Результаты показывают наличие высокой положительной корреляции между плотностью роботизации в выделенных странах и уровнем развития цифровых технологий на их предприятиях. При этом для первых разностей рядов получен значимый коэффициент корреляции между приростом плотности роботизации и приростом технологий межмашинного взаимодействия (для Южной Кореи – 0,54; для Японии – 0,52; для Китая – 0,86),

¹⁸ Robotics & The Cloud // Systemantics Sensible Robotics. URL: <https://www.systemantics.com/robotics-the-cloud/> (дата обращения: 14.03.2025).



Рассчитано авторами по данным: Science, technology and innovation. Information and communication technology (ICT). Broadband and telecom databases // OECD Data Explorer. URL: <https://data-explorer.oecd.org/?lc=en> (дата обращения: 14.03.2025)

Рис. 3. Индекс роста доли предприятий, использовавших облачные вычисления, в общем количестве организаций, 2012 г. = 1

Calculated by the authors based on: Science, technology and innovation. Information and communication technology (ICT). Broadband and telecom databases. OECD Data Explorer. URL: <https://data-explorer.oecd.org/?lc=en> (accessed: 14.03.2025) (In Eng.)

Fig. 3. Growth index of the share of enterprises which use cloud computing in the total number of organizations, 2012 = 1

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между плотностью роботизации в обрабатывающей промышленности страны и уровнем распространения цифровых технологий за период

Table 1

Correlation coefficients between the robot density in the country's industrial sector and the level of digital technology distribution over the period

| Цифровая технология | Южная Корея | | Япония | | Китай | |
|--|-------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| | период | значение | период | значение | период | значение |
| Интернет | 2005–2023 | 0,73* | 1991–2022 | 0,53* | 2002–2023 | 0,81* |
| Мобильный широкополосный доступ в интернет (МШД) | 2009–2023 | 0,87* | 2009–2023 | 0,78* | 2002–2023 | 0,87* |
| Технологии межмашинного взаимодействия (М2М) | 2011–2023 | 0,92* | 2013–2023 | 0,93* | 2002–2023 | 0,99* |
| Интернет вещей (IoT) | 2019–2023 | 0,72* | ... | | 2018–2023 | 0,98* |
| Облачные вычисления | 2012–2023 | 0,84* | 2010–2022 | 0,82* | ... | |
| Аналитика больших данных | 2013–2023 | 0,79* | ... | | ... | |

Примечание: * значимость коэффициентов на уровне 5%.

Рассчитано авторами по данным: Statistics // International Federation of Robotics (IFR). URL: <https://ifr.org/>; DataHub // International Telecommunication Union (ITU). URL: <https://datahub.itu.int/indicators/>; 2024 Yearbook of Enterprise Informatization Statistics // National Information Society Agency. URL: https://eng.nia.or.kr/site/nia_eng/ex/bbs/View.do?cbldx=31975&bcldx=27694&parentSeq=27694 (дата обращения: 28.02.2025)

Calculated by the authors based on: Statistics. International Federation of Robotics (IFR). URL: <https://ifr.org/>; DataHub. International Telecommunication Union (ITU). URL: <https://datahub.itu.int/indicators/>; 2024 Yearbook of Enterprise Informatization Statistics. National Information Society Agency. URL: https://eng.nia.or.kr/site/nia_eng/ex/bbs/View.do?cbldx=31975&bcldx=27694&parentSeq=27694 (accessed: 28.02.2025) (In Eng.)

технологиями МШД (для Южной Кореи – 0,56). Для Китая получены значимые коэффициенты корреляции между приростом плотности роботизации и

приростом распространения технологий 5G (0,8) и Интернета вещей (0,85).

Проведенные тесты на причинность между показателями плотности роботизации и распространением цифровых технологий выявили, что для всех трех стран показатель МШД является причиной роста плотности роботизации. Для Южной Кореи получена односторонняя причинная зависимость плотности роботизации от технологий межмашинного взаимодействия и двухсторонняя – для интернета вещей.

Следует отметить, что в Японии корреляционная зависимость между некоторыми показателями ниже, чем в Южной Корее и Китае, что может быть связано со снижением плотности роботизации с 2011 г., вызванным природными катастрофами того года и связанными с ними нарушениями цепочек поставок.

Моделирование динамики плотности роботизации с учетом влияния диффузии цифровых технологий

Распространение передовых технологий обычно описывается кривыми вида (1) и (2). Помимо логистической и модели Гомпертца, применяется также модель Басса:

$$dY = (b + \frac{k}{L}Y)(L - Y), \quad (5)$$

где Y – показатель распространения этой технологии; L – максимальный размер рынка; b – коэффициент инновации; k – коэффициент имитации.

Для Южной Кореи, Японии и Китая были рассчитаны показатели распространения плотности роботизации по указанным моделям (табл. 2). Для сопоставимости моделей использовалось общее решение (5) вида:

$$Y = \frac{L(be^{(b+k)t} - b)}{(be^{(b+k)t} + k)}. \quad (6)$$

Полученные оценки параметров, коэффициенты детерминации и меньшие суммы квадратов остатков для всех стран позволили отдать предпочтение логистической модели для дальнейшего исследования.

Однако ограничениями рассмотренных моделей является предположение о постоянстве верхнего предела L на большом промежутке времени. Одним из способов решения этой проблемы является модификация модели (1) за счет включения в нее переменного верхнего предела $(1 + x(t))$ [27], отражающего влияние внешних факторов на распространение технологии, в результате чего логистическая модель принимает вид:

Таблица 2

Оценка параметров моделей (1), (2) и (6) по странам

Table 2

Estimation of parameters of models (1), (2) and (6) by country

| Параметры | Логистическая модель (1) | Модель Гомпертца (2) | Модель Басса (6) |
|-----------------------------|--------------------------|----------------------|------------------|
| Южная Корея (2005–2023 гг.) | | | |
| L | 1454,8* | 2693,6* | 1457,0* |
| b | 756,6* | -15,04* | 0,0002* |
| k | 0,182* | 0,067* | 0,181* |
| R^2 | 0,992 | 0,988 | 0,992 |
| S | 13375 | 19679,1 | 13489,8 |
| Япония (1974–2023 гг.) | | | |
| L | 344,1* | 348,26* | 344,3* |
| b | 187,2* | -21,26* | 0,0019* |
| k | 0,33* | 0,22* | 0,325* |
| R^2 | 0,973 | 0,972 | 0,973 |
| S | 25691 | 26115,9 | 25699,8 |
| Китай (2002–2023 гг.) | | | |
| L | 857,0* | 6100,7** | 858,2* |
| b | 2715,7* | -14,096* | 0,0001* |
| k | 0,37* | 0,078* | 0,368* |
| R^2 | 0,999 | 0,998 | 0,999 |
| S | 287,4 | 780,5 | 307,7 |

Примечания: S – сумма квадратов остатков; * р-значение <0,05; ** р-значение <0,1.

Рассчитано авторами

Calculated by the authors

$$Y(t) = \frac{L(1+x(t))}{1+be^{-kt}} \quad (7)$$

В дальнейшем расчет производился по формуле (7), где в качестве $Y(t)$ рассматривался показатель плотности роботизации в ОП страны, а в качестве $x(t)$ – уровень распространения на предприятиях цифровых технологий: интернета, мобильной связи, технологий межмашинного взаимодействия, облачных вычислений, интернета вещей, анализа больших данных. В связи с тем, что рассматриваемые цифровые технологии только начинали распространяться, или по ним нет данных за более ранний период, показатель $1 + x(t)$ отражает влияние передовых цифровых технологий на плотность роботизации в более поздний период.

Расчеты производились в программе STATISTICA с помощью методов нелинейного оценивания. Показатели распространения интернета, технологий межмашинного взаимодействия, IoT рассчитывались как доля организаций, использующих эту технологию, к общему количеству организаций в стране. Показатели распространения мобильного широкополосного доступа и технологии 5G соответствуют количеству пользователей этих технологий на 1 жителя страны.

Учет развития отдельных цифровых технологий дал лучшее приближение к исходным данным, чем исходная базовая модель (1) (например, интернет для Южной Кореи, IoT для Китая, технологии 5G и M2M для Японии, табл. 3).

Таблица 3

Оценка параметров модифицированной модели (7) по странам с учетом развития цифровых технологий

Table 3

Estimation of parameters of the modified model (7) by country taking into account the development of digital technologies

| Параметры | интернет | M2M | МШД | IoT | 5G |
|-----------------------------|----------|---------|---------|----------|--------|
| Южная Корея (2005–2023 гг.) | | | | | |
| L | 1522,7* | 835,0* | 792,3* | 839,6* | 1030* |
| b | 332,6* | 1318** | 202,1** | 2257,3** | 1461** |
| k | 0,160* | 0,228* | 0,138* | 0,248* | 0,221* |
| R^2 | 0,994 | 0,979 | 0,968 | 0,981 | 0,985 |
| S | 10578 | 35154 | 73433,2 | 32843 | 24744 |
| Япония (1974–2023 гг.) | | | | | |
| L | 203,3* | 315,4* | 169,1* | н/д | 334,5* |
| b | 5324,7* | 386,3** | 13549** | | 240,9* |
| k | 0,68* | 0,40* | 0,80** | | 0,35* |
| R^2 | 0,867 | 0,974 | 0,432 | | 0,987 |
| S | 120546 | 24536 | 542409 | | 12609 |
| Китай (2002–2023 гг.) | | | | | |
| L | 1187,9* | 224,1* | 411,3* | 822,1* | 289,0* |
| b | 638,6* | 446,9* | 1271,0* | 2592,8* | 8400** |
| k | 0,30* | 0,34* | 0,33* | 0,37* | 0,53* |
| R^2 | 0,999 | 0,998 | 0,998 | 0,999 | 0,996 |
| S | 342,4 | 934,4 | 646,6 | 285,9 | 1570 |

Примечания: S – сумма квадратов остатков; * р-значение <0,05; ** р-значение <0,1.

Рассчитано авторами

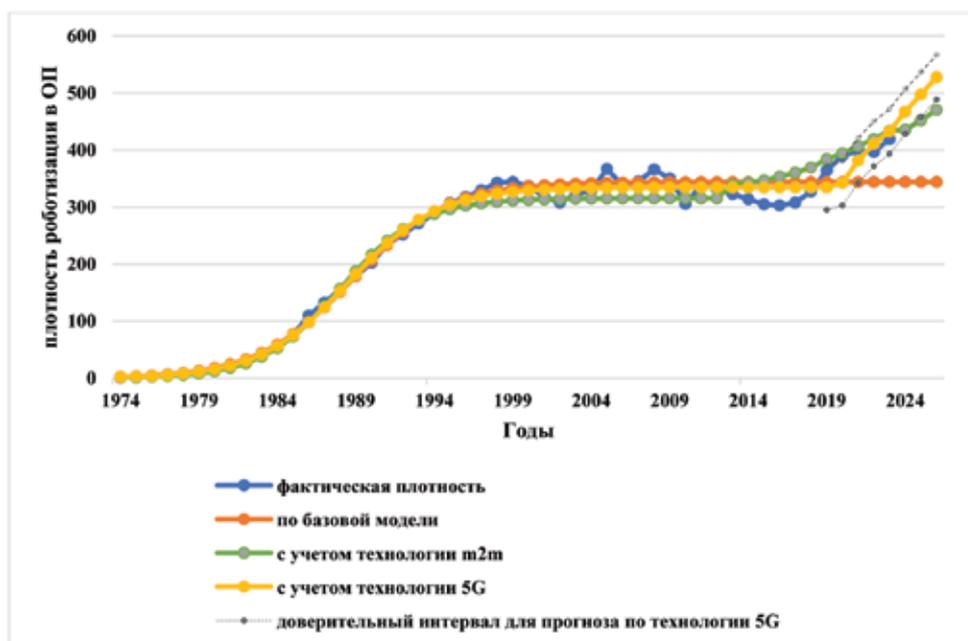
Calculated by the authors

Кроме того, учет влияния распространения цифровых технологий в ОП дает более высокий прогноз будущих тенденций роботизации. Например, для Японии, несмотря на небольшие различия в коэффициенте детерминации и сумме квадратов остатков, базовая модель про-

гнозирует постоянство плотности роботизации в Японии на уровне 344 ед. (рис. 4), тогда как учет распространения технологии M2M больше соответствует тенденциям последних лет к росту плотности роботизации в стране и позволяет оценить этот показатель на уровне 434 ед. в

2026 г. при том же уровне распространения технологии M2M в 2023 г. (37,6%), и на уровне 470

ед. при полиномиальном темпе диффузии M2M (рост до 49% к 2026 г.).



Разработано авторами

Рис. 4. Приближение плотности роботизации в Японии с помощью базовой модели (1) и модифицированной модели (7), учитывающей распространение технологий M2M (межмашинного взаимодействия) и 5G

Developed by the authors

Fig. 4. Approximation of robot density in Japan using the base model (1) and the modified model (7) taking into account the spread of M2M (machine-to-machine) and 5G technologies

Еще более высокая точность приближения плотности роботизации в Японии получена при учете роста доли технологии 5G в общем количестве пользователей мобильным доступом в интернет.

Промышленные роботы в электронной промышленности

Происходит не только влияние цифровых технологий на развитие промышленной робототехники, но и обратное воздействие – все более широкое применение ПР при производстве телекоммуникационного оборудования, чипов, полупроводников и других необходимых для цифровых технологий элементов. Основным применением ПР в производстве полупроводников является обработка кремниевых пластин с помощью сертифицированных для чистых помещений роботизированных манипуляторов, иногда установленных на мобильных

платформах. Многие компоненты, используемые для создания коммуникационного оборудования, чувствительны к пыли и другим частицам, поэтому роботы для чистых помещений изготавливаются из специальных материалов, не накапливающих пыль.

При производстве печатных плат ПР осуществляют обработку и вставку компонентов, пайку, проверку, тестирование и упаковку. Для этих операций часто используются роботы SCARA и коллаборативные роботы. При сборке электронных изделий ПР производят обработку деталей, пайку, склеивание и герметизацию, завинчивание, тестирование и упаковку [28].

Внедрение коллаборативных роботов привело к росту доли электронной промышленности в парке роботов с 18,8% в 2013 г. до 26% в 2022 г. и отгрузок с 36,1 тыс. ед. в 2013 г. до 139,7 тыс. ед. в 2022 г.¹⁹

¹⁹ Statistics // International Federation of Robotics (IFR). URL: <https://ifr.org/> (дата обращения: 13.03.2025).

В 2020–2022 гг. электронная промышленность опережала автомобильную по количеству ежегодно устанавливаемых ПР (рис. 5).

Основная часть роста продаж ПР в электронной промышленности (ЭП) приходится на страны Азии. По данным IFR, в 2017 г. показатель плотности роботизации в ЭП Южной Кореи составлял 533 ед., в Японии – 225 ед., в Китае – 30 ед. В 2019 г. доля стран Азиатско-Тихоокеанского региона в парке роботов в электротехнической и электронной промышленности составила 88,3%²⁰. Это в первую очередь связано с продолжающейся установкой крупногабаритных роботов в этой отрасли в Южной Корее. В Сингапуре 90% ПР установлены в ЭП, страна занимает второе место по плотности роботизации в ОП (770 роботов на 10 тыс. занятых в 2023 г.).

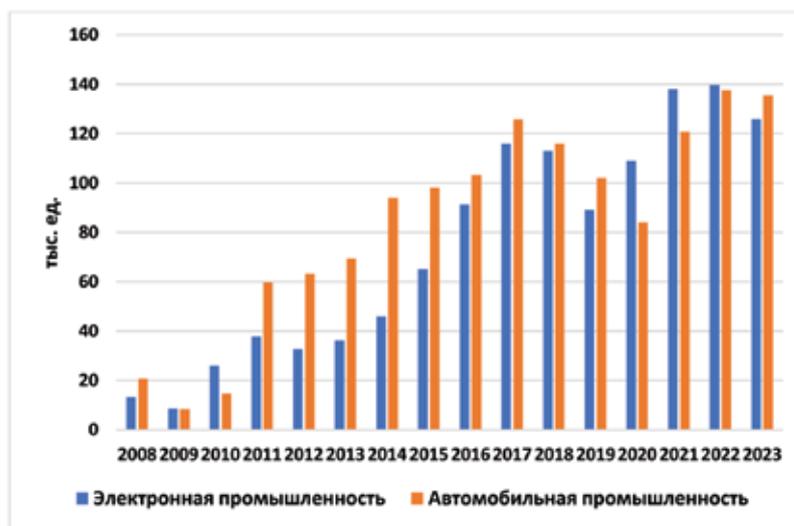
ЭП оказалась одной из наиболее пострадавших от торгового конфликта между Китаем и США. Если в 2019 г. на страны Азиатско-Тихоокеанского

региона приходилось 71,3% мировых продаж полупроводников, то в 2024 г. эта доля снизилась до 60,9% при росте доли Америки с 19,1% до 30,9% за тот же период (рассчитано по данным²¹).

Тем не менее, в 2022 г. 91% от общего числа установок ПР в электротехнической и электронной промышленности пришлось на 5 экономических регионов, которые являются основными производственными базами отрасли: на Китай пришлось 64% от общего числа установленных ПР, на Японию – 12%, на Южную Корею – 9%, на Сингапур и Тайвань – по 3%²².

В 2023 г. на долю ЭП Южной Кореи приходилось 39,8% от ежегодно устанавливаемых ПР в стране, в Японии – 32,6%, в Китае – 27,9%.

Как один из наиболее автоматизированных секторов, ЭП требует высокоскоростных, высокоточных роботизированных систем для сборки сложных продуктов, таких как смартфоны, полупроводники и печатные платы. Растущая ми-



Составлено авторами по данным: Statistics // International Federation of Robotics (IFR). URL: <https://ifr.org/> (дата обращения: 13.03.2025)

Рис. 5. Динамика мировых ежегодных отправок ПР в автомобильной и электронной промышленности, тыс. ед.

Compiled by the authors based on: Statistics. International Federation of Robotics (IFR). URL: <https://ifr.org/> (accessed: 13.03.2025) (In Eng.)

Fig. 5. Dynamics of global annual shipments of IR in the automotive and electronics industries, thousand units

²⁰ Introduction to IFR Industrial Robot Data // CnOpenData. URL: <https://www.cnopendata.com/en/data/m/global/IFR.html> (дата обращения: 13.05.2025).

²¹ More Than 35 Years Authentic Market Monitoring by WSTS // World Semiconductor Trade Statistics. URL: <https://www.wsts.org/> (дата обращения: 13.05.2023).

²² 2023年度 ロボット産業・技術振興に関する 調査研究報告書 // JMF. URL: https://www.jmf.or.jp/jmf/wp-content/uploads/2024/04/23rbaw_h.pdf (дата обращения: 02.05.2025).

ниатюризация электронных компонентов еще больше стимулирует спрос на точных роботов, способных выполнять сложные сборочные задачи. ПР стали незаменимыми при обработке деликатных компонентов, сборке сложных изделий и тестировании. Эти роботы оснащены передовыми датчиками, системами технического зрения и ИИ, способны работать на высоких скоростях, что значительно сокращает время, необходимое для выполнения повторяющихся задач. В ЭП, где продукция часто производится в больших количествах, эта повышенная скорость помогает компаниям соблюдать жесткие сроки производства и повышать производительность²³.

Моделирование влияния количества роботов в электронной промышленности на показатели отрасли

В этой части работы проведено исследование влияния парка роботов в ЭП на результаты отрасли на примере Японии. В настоящее время ЭП характеризуется наибольшим спросом на роботов в стране. По данным IFR и Japan Electronics and Information Technology Industries Association (JEITA) построена модель зависимости объемов производства, экспорта и импорта промышленного оборудования в общем объеме производства ЭП

Японии от парка роботов, установленных на предприятиях этой отрасли, за период 2007–2023 гг. Модели имеют вид:

$$Y_i = a + b * X + c * T + d * Z, i = 1, 2, 3, \quad (8)$$

где Y_1 – объем производства промышленного электронного оборудования Японии, млн иен; Y_2 – объем экспорта промышленного электронного оборудования Японии; Y_3 – объем импорта промышленного электронного оборудования (все данные – JEITA²⁴); X – парк роботов в электронной промышленности Японии, тыс. ед. (рассчитано авторами по данным IFR и JARA²⁵); T – период времени между текущим годом и 2006 г. ($T = \text{год}-2006$); Z – среднегодовой курс иены по отношению к доллару (данные World Bank).

Оценки параметров модели (8) получены с помощью коррекции стандартных ошибок в форме Huber-White-Hinkley (табл. 4). Расчет статистики Дарбина-Уотсона для экспорта промышленного оборудования показал отсутствие автокорреляции первого порядка, а для переменных объема производства и импорта – неопределенность ($d_1 = 0,708$, $d_2 = 1,422$ для 18-ти наблюдений и 3-х переменных).

Таблица 4

Оценка параметров модели (8) для электронной промышленности Японии за период 2007–2024 гг.

Table 4

Estimation of the parameters of the model (8) for the electronics industry of Japan for the period 2007–2024

| Параметр | Производство | Экспорт | Импорт |
|----------|--------------|---------|----------|
| a | 11729,0* | 1637,6* | -7238,7* |
| | (546,4) | (251,1) | (715,7) |
| b | 58,1* | 20,4* | -20,5** |
| | (5,8) | (2,7) | (11,8) |
| c | -403,5* | -96,4* | 306,4* |
| | (23,7) | (9,6) | (33,5) |
| d | 7,5* | 12,2* | 30,6* |
| | (2,6) | (1,8) | (7,4) |
| R^2 | 0,96 | 0,91 | 0,96 |
| DW | 1,23 | 1,91 | 1,14 |

Примечания: данные в скобках – стандартные ошибки параметров; * р-значение <0,01; ** р-значение <0,1

Рассчитано авторами

Calculated by the authors

²³ Electronics Industry Robots // Barcode Technology. URL: <https://free-barcode.com/barcode/robot-technology/electronics-industry-robots.asp> (дата обращения: 03.03.2025).

²⁴ Production and Exports/Imports of Electronic Equipment // Japan Electronics and Information Technology Industries Association (JEITA). URL: <https://www.jeita.or.jp/english/stat/electronic/2024/> (дата обращения: 12.03.2025).

²⁵ Yearly Results (JARA Members and Non-members) // Japan Robot Association (JARA). URL: <https://www.jara.jp/e/data/yearly.html> (дата обращения: 11.03.2025).

Тесты на единичный корень ряда остатков для моделей с переменными Y_1 и Y_2 подтвердили их стационарность на уровне значимости 5%, для Y_3 – на уровне 10%.

Результаты оценивания свидетельствуют о значимом положительном влиянии использования ПР в ЭП Японии на объемы ее производства и экспорта. Увеличение парка ПР в ЭП на 1 тыс. ед. приводит к росту производства в отрасли на 58,5 млн иен, экспорта – на 20,9 млн иен, в то время как импорт снижается на 21,2 млн иен. Увеличение стоимости доллара относительно иены также положительно влияет на объем производства промышленного электронного оборудования, влияние же всех остальных факторов, учтенных в показателе времени, отрицательно коррелирует с производством и экспортом, и положительно – с импортом.

Кроме того, необходимо отметить снижение средней стоимости 1 ПР, установленного в ЭП Японии, почти на 20% за период 2013–2023 гг. (с 6 млн иен в 2013 г. до 4,84 млн иен в 2023 г. – рассчитано по данным JARA²⁶), что способствует дальнейшему распространению ПР в этой отрасли.

Выводы

Результаты проведенного исследования подтверждают наличие большого взаимного влияния, синергии цифровых технологий и робототехники. Передовые информационно-коммуникационные технологии повышают степень распространения роботизации в развитых странах, переводят на более высокий уровень взаимодействие человека и работа, открывают новые способы использования ПР на умном производстве. С учетом того, что цифровые технологии в промышленности еще не достигли стадии насыщения, дальнейшее распространение ПР будет зависеть от уровня их развития. В первую очередь это касается технологий межмашинного взаимодействия, ИИ и технологий мобильной связи.

Сделанный в исследовании акцент на ведущих странах Азии обусловлен тем, что они являются мировыми лидерами в развитии роботизации и

цифровизации своих экономик, а также оказывают существенное влияние на экономическое развитие всего Азиатско-Тихоокеанского региона.

На примере Японии получен прогноз распространения ПР при сохранении экспоненциального роста технологий мобильной связи 5G и тенденций распространения технологий межмашинного взаимодействия. Для дальнейших исследований в этом направлении необходимо располагать большим количеством информации, включая распространение промышленного интернета вещей, аналитики больших данных.

В то же время, широкое применение ПР в ЭП при производстве коммуникационного оборудования, полупроводников и печатных плат повышает качество и эффективность продукции, обеспечивает надежность и масштабируемость производства. Для Японии выявлено значимое положительное влияние использования ПР в ЭП на объемы производства и экспорта промышленного электронного оборудования. Поэтому процессы автоматизации и цифровизации производства должны идти параллельно для усиления эффекта от их использования, в первую очередь – за счет широкого распространения высокоскоростных беспроводных сетей, облачных услуг, а также повышения плотности роботизации в ЭП.

При этом для максимального использования преимуществ автоматизации необходимо повышать квалификацию работников, стимулировать их к получению новых цифровых навыков и обеспечить соответствующую и доступную для них образовательную инфраструктуру.

Кроме того, на примере ведущих стран Азии следует отметить важность государственной поддержки компаний, внедряющих технологии автоматизации, особенно малых и средних предприятий.

Дальнейшие исследования в этом направлении предполагают системный подход к моделированию развития роботизации и цифровизации, учет влияния «умных производств» на окружающую среду, на общую занятость в промышленности, особенности регионального развития.

Список источников

1. Gao K., Wijekoon C.B. Digital transformation of production tools: industrial robots transform inventory management in manufacturing // *Procedia Computer Science*. 2023. Vol. 228. P. 1246–1253. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.11.098>
2. Zeydan E., Arslan S., Turk Y. 6G wireless communications for industrial automation: scenarios, requirements and challenges // *Journal of Industrial Information Integration*. 2024. Vol. 42. P. 100732. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100732>

²⁶ Yearly Results (JARA Members and Non-members) // Japan Robot Association (JARA). URL: <https://www.jara.jp/e/data/yearly.html> (дата обращения: 11.03.2025).

3. *Dagli N., Dagli R., Thangavelu L.* Interaction of millimetre waves used in 5G network with cells and tissues of head-and-neck region: a literature review // *Advanced in Human Biology*. 2023. Vol. 13. Iss. 2. P. 168–176. https://doi.org/10.4103/aihb.aihb_133_22
4. *Du J., He J., Yang J., Chen X.* How industrial robots affect labor income share in task model: evidence from Chinese A-share listed companies // *Technological Forecasting and Social Change*. 2024. Vol. 208. P. 123655. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123655>
5. *Zhao Y., Said R., Ismail N.W., Hamzah H.Z.* Impact of industrial robot on labour productivity: empirical study based on industry panel data // *Innovation and Green Development*. 2024. Vol. 3. Iss. 2. P. 100148. <https://doi.org/10.1016/j.igd.2024.100148>
6. *Albinowski M., Lewandowski P.* The impact of ICT and robots on labour market outcomes of demographic groups in Europe // *Labour Economics*. 2024. Vol. 87. P. 102481. <https://doi.org/10.1016/j.labeco.2023.102481>
7. *Acemoglu D., Restrepo P.* Robots and jobs: evidence from US labor markets // *Journal of Political Economy*. 2017. Vol. 128. Iss. 6. P. 2188–2244. <https://doi.org/10.1086/705716>
8. *Kromann L., Malchow-Møller N., Skaksen J.R., Sørensen A.* Automation and productivity – a cross-country, cross-industry comparison // *Industrial and Corporate Change*. 2020. Vol. 29. Iss. 2. P. 265–287. <https://doi.org/10.1093/icc/dtz039>
9. *Na-yeon H.* Robotics integration in manufacturing: case study of South Korea // *Asian Journal of Computing and Engineering Technology*. 2024. Vol. 5. Iss. 1. P. 42–53. <https://doi.org/10.47604/ajcet.2810>
10. *Stiebale J., Suedekum J., Woessner N.* Robots and the rise of European superstar firms // *International Journal of Industrial Organization*. 2024. Vol. 97. P. 103085. <https://doi.org/10.1016/j.ijindorg.2024.103085>
11. *Zhang H., Ding Y., Niu J., Jung S.* How artificial intelligence affects international industrial transfer – evidence from industrial robot application // *Journal of Asian Economics*. 2024. Vol. 95. P. 101815. <https://doi.org/10.1016/j.asieco.2024.101815>
12. *Lessi C.C., Gavrielides A., Solina V., Qiu R., Nicoletti L., Li D.* 5G and beyond 5G technologies enabling industry 5.0: network applications for robotics // *Procedia Computer Science*. 2024. Vol. 232. P. 675–687. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.067>
13. *Dzedzickis A., Subačiūtė-Žemaitienė J., Šutinys E., Samukaite-Bubniene U., Bučinskas V.* Advanced applications of industrial robotics: new trends and possibilities // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Iss. 1. P. 135. <https://doi.org/10.3390/app12010135>
14. *Kovič K., Ojsteršek R., Palčič I.* Simultaneous use of digital technologies and industrial robots in manufacturing firms // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Iss. 10. P. 5890. <https://doi.org/10.3390/app13105890>
15. *Ansari J., Andersson C., De Bruin P., Farkas J., Grosjean L., Sachs J., Torsner J., Varga B., Harutyunyan D., König N., Schmitt R.H.* Performance of 5G trials for industrial automation // *Electronics*. 2022. Vol. 11. Iss. 3. P. 412. <https://doi.org/10.3390/electronics11030412>
16. *Sanneman L., Fourie C., Shah J.A.* The state of industrial robotics: emerging technologies, challenges, and key research directions // *Foundations and Trends in Robotics*. 2020. Vol. 8. Iss. 3. P. 225–306. <https://doi.org/10.1561/23000000065>
17. *Alankus O.B.* Technology forecast for electrical vehicle battery technology and future electric vehicle market estimation // *Advances in Automobile Engineering*. 2017. Vol. 06. Iss. 02. <https://doi.org/10.4172/2167-7670.1000164>
18. *Gompertz B.* On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and a new mode of determining the value of life contingencies // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1825. Vol. 115. P. 513–583. URL: <https://www.jstor.org/stable/107756> (дата обращения: 19.03.2025).
19. *Bretschneider S., Bozeman B.* Adaptive diffusion models for the growth of robotics in New York state industry // *Technological Forecasting and Social Change*. 1986. Vol. 30. Iss. 2. P. 111–121. [https://doi.org/10.1016/0040-1625\(86\)90014-4](https://doi.org/10.1016/0040-1625(86)90014-4)
20. *Michalakelis C., Varoutas D., Spicopoulos T.* Diffusion models of mobile telephony in Greece // *Telecommunications Policy*. 2008. Vol. 32. Iss. 3-4. P. 234–245. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2008.01.004>
21. *Mushi R.M.* Assessing the acceptance of mobile phone technology in Tanzanian SMEs // *Journal of Electronic Business and Digital Economics*. 2024. Vol. 3. Iss. 2. P. 170–183. <https://doi.org/10.1108/JEBDE-10-2023-0026>

22. Щепина И. Н., Медведева Д.А. Анализ распространения интернета на основе моделей диффузии // В сб.: Электронный Бизнес: проблемы, развитие и перспективы. Материалы XVIII Всероссийской заочной научно-практической конференции. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2020. С. 139–144. EDN: <https://elibrary.ru/udmxrr>
23. Bohlin A., Gruber H., Koutroumpis P. Diffusion of new technology generations in mobile communications // *Information Economy and Policy*. 2010. Vol. 22. Iss. 1. P. 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.infoecopol.2009.11.001>
24. Земцов С. П., Бабурин В. Л. Моделирование диффузии инноваций и типология регионов России на примере сотовой связи // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2017. № 4. С. 17–30. EDN: <https://elibrary.ru/zcicst>. <https://doi.org/10.7868/S0373244417100024>
25. Kabir H., Tham M.-L., Chang Y.C. Internet of robotic things for mobile robots: concepts, technologies, challenges, applications, and future directions // *Digital Communications and Networks*. 2023. Vol. 9. Iss. 6. P. 1265–1290. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2023.05.006>
26. Boshoff M., Schuster D., Christ L., Heseniuss M., Gruhn V., Kühlenkötter B. Evaluation of 5G edge and cloud computing for data processing in visual referencing of mobile robot manipulators // *Procedia CIRP*. 2023. Vol. 120. P. 774–779. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.074>
27. Bass F.M., Krishnan T.V., Jain D.C. Why the Bass model fits without decision variables // *Marketing Science*. 1994. Vol. 13. Iss. 3. P. 203–223. <http://doi.org/10.1287/mksc.13.3.203>
28. Bogue R. The role of robots in the electronics industry // *Industrial Robot*. 2023. Vol. 50. Iss. 5. P. 717–721. <https://doi.org/10.1108/ir-04-2023-0082>

Статья поступила в редакцию 18.03.2025; одобрена после рецензирования 07.07.2025; принята к публикации 21.07.2025

Об авторах:

Дубинина Марина Геннадьевна, кандидат экономических наук, доцент; старший научный сотрудник Лаборатории моделирования экономической стабильности; SPIN-код: 7084-9662

Дубинина Виктория Васильевна, младший научный сотрудник Лаборатории моделирования экономической стабильности; SPIN-код: 3049-0083

Вклад авторов:

Дубинина М. Г. – проведение критического анализа материалов; развитие методологии; формирование выводов.

Дубинина В. В. – поиск источников; сбор данных по промышленным роботам; подготовка предварительного варианта статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

References

1. Gao K., Wijekoon C. B. Digital transformation of production tools: industrial robots transform inventory management in manufacturing. *Procedia Computer Science*. 2023; 228:1246–1253. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.11.098> (In Eng.)
2. Zeydan E., Arslan S., Turk Y. 6G wireless communications for industrial automation: scenarios, requirements and challenges. *Journal of Industrial Information Integration*. 2024; 42:100732. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100732> (In Eng.)
3. Dagli N., Dagli R., Thangavelu L. Interaction of millimetre waves used in 5G network with cells and tissues of head-and-neck region: a literature review. *Advanced in Human Biology*. 2023; 13(2):168–176. https://doi.org/10.4103/aihb.aihb_133_22 (In Eng.)
4. Du J., He J., Yang J., Chen X. How industrial robots affect labor income share in task model: evidence from Chinese A-share listed companies. *Technological Forecasting and Social Change*. 2024; 208:123655. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123655> (In Eng.)
5. Zhao Y., Said R., Ismail N.W., Hamzah H.Z. Impact of industrial robot on labour productivity: empirical study based on industry panel data. *Innovation and Green Development*. 2024; 3(2):100148. <https://doi.org/10.1016/j.igd.2024.100148> (In Eng.)

6. Albinowski M., Lewandowski P. The impact of ICT and robots on labour market outcomes of demographic groups in Europe. *Labour Economics*. 2024; 87:102481. <https://doi.org/10.1016/j.labeco.2023.102481> (In Eng.)
7. Acemoglu D., Restrepo P. Robots and jobs: evidence from US labor markets. *Journal of Political Economy*. 2017; 128(6):2188–2244. <https://doi.org/10.1086/705716> (In Eng.)
8. Kromann L., Malchow-Møller N., Skaksen J.R., Sørensen A. Automation and productivity – a cross-country, cross-industry comparison. *Industrial and Corporate Change*. 2020; 29(2):265–287. <https://doi.org/10.1093/icc/dtz039> (In Eng.)
9. Na-yeon H. Robotics integration in manufacturing: case study of South Korea. *Asian Journal of Computing and Engineering Technology*. 2024; 5(1):42–53. <https://doi.org/10.47604/ajcet.2810> (In Eng.)
10. Stiebale J., Suedekum J., Woessner N. Robots and the rise of European superstar firms. *International Journal of Industrial Organization*. 2024; 97:103085. <https://doi.org/10.1016/j.ijindorg.2024.103085> (In Eng.)
11. Zhang H., Ding Y., Niu J., Jung S. How artificial intelligence affects international industrial transfer – Evidence from industrial robot application. *Journal of Asian Economics*. 2024; 95:101815. <https://doi.org/10.1016/j.asieco.2024.101815> (In Eng.)
12. Lessi C.C., Gavrielides A., Solina V., Qiu R., Nicoletti L., Li D. 5G and beyond 5G technologies enabling industry 5.0: network applications for robotics. *Procedia Computer Science*. 2024; 232:675–687. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.067> (In Eng.)
13. Dzedzickis A., Subačiūtė-Žemaitienė J., Šutinys E., Samukaite-Bubniene U., Bučinskis V. Advanced applications of industrial robotics: new trends and possibilities. *Applied Sciences*. 2022; 12(1):135. <https://doi.org/10.3390/app12010135> (In Eng.)
14. Kovič K., Ojsteršek R., Palčič I. Simultaneous use of digital technologies and industrial robots in manufacturing firms. *Applied Sciences*. 2023; 13(10):5890. <https://doi.org/10.3390/app13105890> (In Eng.)
15. Ansari J., Andersson C., De Bruin P., Farkas J., Grosjean L., Sachs J., Torsner J., Varga B., Harutyunyan D., König N., Schmitt R.H. Performance of 5G trials for industrial automation. *Electronics*. 2022; 11(3):412. <https://doi.org/10.3390/electronics11030412> (In Eng.)
16. Sanneman L.M., Fourie C.K., Shah J.A. The state of industrial robotics: emerging technologies, challenges, and key research directions. *Foundations and Trends in Robotics*. 2020; 8(3):225–306. <https://doi.org/10.1561/23000000065> (In Eng.)
17. Alankus O.B. Technology forecast for electrical vehicle battery technology and future electric vehicle market estimation. *Advances in Automobile Engineering*. 2017; 06(02). <https://doi.org/10.4172/2167-7670.1000164>. (In Eng.)
18. Gompertz B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and a new mode of determining the value of life contingencies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1825; 115:513–583. URL: <https://www.jstor.org/stable/107756> (accessed: 19.03.2025) (In Eng.)
19. Bretschneider S., Bozeman B. Adaptive diffusion models for the growth of robotics in New York state industry. *Technological Forecasting and Social Change*. 1986; 30(2):111–121. [https://doi.org/10.1016/0040-1625\(86\)90014-4](https://doi.org/10.1016/0040-1625(86)90014-4) (In Eng.)
20. Michalakelis C., Varoutas D., Spicopoulos T. Diffusion models of mobile telephony in Greece. *Telecommunications Policy*. 2008; 32(3-4):234–245. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2008.01.004> (In Eng.)
21. Mushi R.M. Assessing the acceptance of mobile phone technology in Tanzanian SMEs. *Journal of Electronic Business & Digital Economics*. 2024; 3(2):170–183. <https://doi.org/10.1108/JEBDE-10-2023-0026> (In Eng.)
22. Shchepina I.N., Medvedeva D.A. Analysis of the spread of the Internet based on diffusion models. In: *Electronic Business: problems, development and prospects. Proceedings of the XVIII All-Russian correspondence scientific and practical conference*. Voronezh: Voronezh State University, 2020. P. 139–144. EDN: <https://elibrary.ru/udmxrr> (In Russ.)
23. Bohlin A., Gruber H., Koutroumpis P. Diffusion of new technology generations in mobile communications. *Information Economy and Policy*. 2010; 22(1):51–60. <https://doi.org/10.1016/j.infoecopol.2009.11.001> (In Eng.)
24. Zemtsov S.P., Baburin V.L. Modeling of diffusion of innovation and typology of Russian regions: a case study of cellular communication. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2017; (4):17–30. EDN: <https://elibrary.ru/zcicst>. <https://doi.org/10.7868/S0373244417100024> (In Russ.)

25. Kabir H., Tham M.-L., Chang Y.C. Internet of robotic things for mobile robots: concepts, technologies, challenges, applications, and future directions. *Digital Communications and Networks*. 2023; 9(6):1265–1290. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2023.05.006> (In Eng.)
26. Boshoff M., Schuster D., Christ L., Heseniun M., Gruhn V., Kuhlenkötter B. Evaluation of 5G edge and cloud computing for data processing in visual referencing of mobile robot manipulators. *Procedia CIRP*. 2023; 120:774–779. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.074> (In Eng.)
27. Bass F.M., Krishnan T.V., Jain D.C. Why the Bass model fits without decision variables. *Marketing Science*. 1994; 13(3):203–223. URL: <http://doi.org/10.1287/mksc.13.3.203> (accessed: 19.03.2025) (In Eng.)
28. Bogue R. The role of robots in the electronics industry. *Industrial Robot*. 2023; 50(5):717–721. <https://doi.org/10.1108/ir-04-2023-0082> (In Eng.)

The article was submitted 18.03.2025; approved after reviewing 07.07.2025; accepted for publication 21.07.2025

About the authors:

Marina G. Dubinina, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Laboratory of Economic Stability Modeling; SPIN: 7084-9662

Victoria V. Dubinina, Junior Researcher, Laboratory of Economic Stability Modeling; SPIN: 3049-0083

Contribution of the Authors:

Dubinina M. G. – critical analysis of the materials; development of the methodology; drawing conclusions.

Dubinina V. V. – search for sources; collecting data on industrial robots; preparing the initial version of the text.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.
