

DOI: 10.17747/2618-947X-2022-3-210-225

УДК 65.011.56, 338.45

JEL O14



Стратегия цифровой трансформации промышленных предприятий: эффекты внедрения технологий умного производства

С.В. Илькевич¹¹ Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Москва, Россия)

Аннотация

Социально-экономические эффекты внедрения технологий умного производства представляют существенный интерес с точки зрения их обобщения и систематизации на текущем этапе цифровой трансформации промышленных предприятий, а также тех задач, которые стоят в контексте модернизации промышленности и построения новых моделей бизнеса. Предложенная в статье систематизация базируется на выделении трех групп социально-экономических эффектов по основной направленности их действия. Первая группа эффектов по основному вектору действия приводит к снижению затрат промышленных предприятий. Вторая группа эффектов ведет преимущественно к повышению выручки: одни эффекты в большей степени в краткосрочном и среднесрочном периоде, другие – в долгосрочной перспективе, в том числе благодаря созданию долгосрочных отличительных способностей, уникальных компетенций, устойчивых конкурентных преимуществ у промышленных компаний. Третья группа эффектов – это более широкие по фокусу воздействия социально-экономические эффекты, имеющие мультипликативное воздействие, а также характер действия положительных экстерналий (внешних эффектов).

В результате систематизации автором выявлено по трем группам соответственно 12, 8 и 13 эффектов внедрения комплекса технологий умного производства. Автор отмечает особую важность исследования социально-экономических эффектов внедрения технологий умного производства, поскольку многие улучшения на стыке производства и социальной трансформации являются в настоящее время недостаточно изученными, в отличие от собственно производственных эффектов, некоторые из которых научное и экспертное сообщества исследовали достаточно подробно. Систематизация, классификация, разграничение и количественная оценка различных социально-экономических эффектов комплекса технологий умного производства могут и даже в некотором смысле должны (в контексте задач модернизации экономики и промышленности Российской Федерации) стать отдельной предметной областью на стыке управления эффективностью (Performance Management) и умного производства (Smart Manufacturing).

Ключевые слова: умное производство, промышленные предприятия, промышленность, цифровые технологии, цифровая экономика, цифровая трансформация, индустрия 4.0, киберфизическая система, бизнес-модели, цифровые двойники.

Для цитирования:

Илькевич С.В. (2022). Стратегия цифровой трансформации промышленных предприятий: эффекты внедрения технологий умного производства. *Стратегические решения и риск-менеджмент*, 13(3): 210–225. DOI: 10.17747/2618-947X-2022-3-210-225.

Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет бюджетных средств по государственному заданию Финансового университета.

Strategy of digital transformation of industrial enterprises: The effects of the introduction of smart manufacturing technologies

S.V. Ilkevich¹¹ Financial University under the Government of the Russian Federation (Moscow, Russia)

Abstract

The socio-economic effects from the introduction of smart manufacturing technologies are of significant interest in terms of their generalisation and systematisation at the current stage of the digital transformation on industrial enterprises, as well as the objectives in the context of industrial modernization and new business model development. The proposed systematisation is based on the allocation of three groups of socio-economic effects according to the main direction of their action. The first group of effects primarily leads to reduction in the costs of industrial enterprises. The second group of effects leads mainly to an increase in revenues: some effects to a greater extent in the short and medium term, others in the long term, including through the creation of long-term distinctive capabilities, unique competencies, and sustainable competitive advantages for industrial companies. The third group of effects includes social and economic effects that are broader in focus and have a multiplicative effect, as well as the character of positive externalities (external effects).

As a result of systematisation, the author identified in three groups, respectively, 12, 8 and 13 effects from the implementation of the complex of smart manufacturing technologies. The author stresses the particular importance of studying the socio-economic effects from the implementation of smart manufacturing technologies, since many improvements at the intersection of production and social transformation are currently insufficiently studied. It contrasts to the core production effects, many of which have been studied in sufficient detail by the scientific and expert communities. Systematisation, classification, differentiation and quantitative assessment of various socio-economic effects of the complex of smart manufacturing technologies can and even in a certain sense should (in the context of the tasks to modernise the economy and industries of the Russian Federation) become a separate subject area at the intersection of performance management and smart production.

Keywords: smart manufacturing, industrial enterprises, industry, digital technology, digital economy, digital transformation, Industry 4.0, cyber-physical system, business models, digital twins.

For citation:

Ilkevich S.V. (2022). Strategy of digital transformation of industrial enterprises: The effects of the introduction of smart manufacturing technologies. *Strategic Decisions and Risk Management*, 13(3): 210-225. DOI: 10.17747/2618-947X-2022-3-210-225. (In Russ.)

Acknowledgements

The article was prepared based on the results of research carried out at the expense of budgetary funds under the state assignment of Financial University.

Введение

Система умного производства в рамках общего тренда становления и развития цифровой экономики стала одним из самых значимых комплексов технологий. В соответствии с определением Национального института стандартов и технологий США (NIST), умное производство (Smart Manufacturing) – это «полностью интегрированные корпоративные производственные системы, которые способны в реальном масштабе времени реагировать на изменяющиеся условия производства, требования сетей поставок и удовлетворять потребности клиентов» [Мерзликина, 2021]. Понятие «умное производство» можно также определить как интеллектуальное управление и оптимизацию бизнес-, производственных и цифровых процессов по всей цепочке создания стоимости в режиме реального времени [Geerts, 2016]. В ракурсе еще одного определения акцент сделан на потенциале повышения производительности: умное производство представляет собой совокупность технологий обработки больших данных, искусственного интеллекта и передовой робототехники, взаимосвязанных машин и инструментов, используемых для повышения производительности предприятия и оптимизации энергии и рабочей силы [Phuyal et al., 2020a]. Комплекс технологий «умное производство» в самой расширительной и перечислительной трактовке объединяет цифровой дизайн продукта, аналитику, производственный процесс, систему запасов и цепочки поставок, кастомизацию продукта, блоки операционных процессов в режиме реального времени, систему доставки продукта и конечных клиентов с помощью облачных вычислений, которые позволяют наращивать производство под заказ и позволяют делать кастомизацию продукта и общее поддержание экосистемы спроса и предложения более эффективными [Phuyal et al., 2020b].

Очень схожее понятие (которое в контексте настоящего исследования целесообразно использовать как полный аналог для термина «умное производство») «умная фабрика» обозначает фабрику, достигшую уровня, который делает возможными функции самоорганизации в производстве и во всех процессах, связанных с ним. Основное преимущество состоит во взаимном дополнении диверсифициро-

ванных областей производственной экосистемы, от умного производства до умных логистических сетей [Strozzi et al., 2017]. Широкие возможности позволяют выполнять операции с минимальным ручным вмешательством и высокой надежностью в различных аспектах экосистемы, включая высокие значения автоматизированных рабочих процессов, синхронизацию активов, улучшенное отслеживание и планирование, оптимизированное потребление энергии, присущие умной фабрике, для повышения производительности, времени безотказной работы и качества. Ключевые способности умной фабрики тесно взаимосвязаны, прозрачны, проактивны и гибки. Это помогает в общей эффективности сети поставок экосистемы [Odważny et al., 2018].

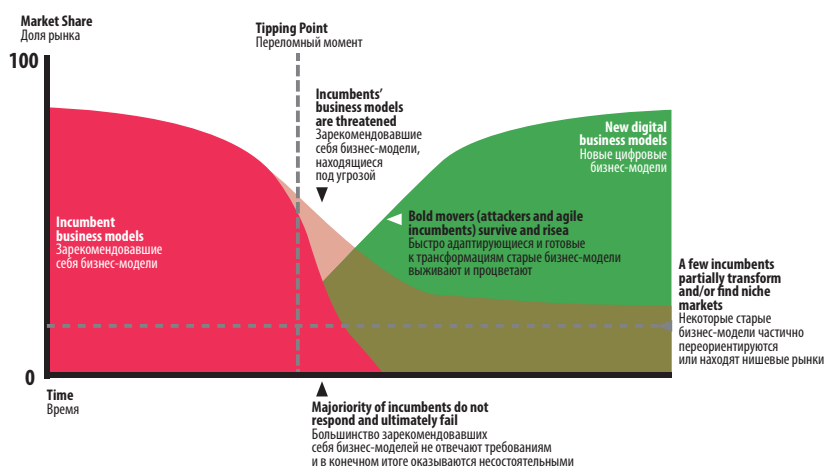
Вместе с тем существует точка зрения, что два комплекса технологий – «цифровой дизайн» и «кастомизированный продукт» – целесообразнее рассматривать как отдельные компоненты развития цифровой трансформации промышленных предприятий за рамками умного производства в более узком смысле. Вычленение этих двух комплексов технологий обосновывается в первую очередь автономностью (как программной, так и процессной и организационной), а также отличительными особенностями их внедрения и спецификой логики коммерциализации технологий, а также теми специфическими эффектами, которые были выявлены отдельно для кастомизации в контексте цифровой трансформации промышленных предприятий [Титов, Титова, 2022]. На основании этих соображений в настоящей работе предпочтение отдано более узкому определению умного производства, поскольку это представляется целесообразным также с точки зрения описания и систематизации всей совокупности социально-экономических эффектов от внедрения комплекса технологий «умное производство». Более узкая трактовка умного производства позволяет точнее определить и разграничить его эффекты в контексте цифровой трансформации промышленных предприятий.

Также представляется очень важным понимать взаимосвязь между различными комплексами технологий и выбором специфических, нишевых бизнес-моделей промышленными предприятиями. Так, в монографии под редакцией А.В. Трачука «Трансформация промышленности в условиях

четвертой промышленной революции» представлены три отличительные бизнес-модели: умный автоматизированный завод, завод, ориентированный на клиента, мобильный завод [Трачук и др., 2018]. И логично предполагать, что промышленные предприятия, сконцентрированные на внедрении комплекса технологий «умное производство» будут тяготеть к бизнес-модели «умный автоматизированный завод». Успех бизнеса промышленного предприятия принципиально зависит от степени комплементарности комплекса цифровых технологий и бизнес-модели, так как нестыковки отразятся на устойчивости и результативности как отдельных блоков бизнес-процессов, так и всей стратегии.

В промышленности процессы создания стоимости меняются по мере того, как информационные и коммуникационные технологии интегрируются с производственными процессами. Это изменение может привести к повышению эффективности и новым бизнес-моделям. Цифровой прорыв, воплощенный в умном производстве, уже наступил и происходит быстрее, чем многие компании предполагали. Многочисленные исследования показали, что применение интеллектуальных производственных технологий дает преимущества первопроходца (first mover advantage). Например, компании среднего размера, которые более продвинуты во внедрении цифровых технологий, растут значительно быстрее, чем отстающие компании. Производители могут действовать на опережение, начать извлекать выгоду и использовать новые возможности. Также исследования демонстрируют, что отношения между вложениями в технологии умного производства и четвертой промышленной революции, результатами инновационной деятельности и ростом производительности нелинейны и имеют устойчивую положительную взаимосвязь только после того, как достигнута определенная критическая масса вложений [Трачук, Линдер, 2020]. Большинство компаний, которые не адаптируют свои бизнес-модели к возможностям, создаваемым цифровыми технологиями, потерпят неудачу [Bughin et al., 2018]. На рис. 1 показан переломный момент, когда происходит резкое сокращение доли рынка традиционных компаний, которые не смогли отреагировать на вызовы цифровой экономики. Отчасти это происходит по причине недостаточно структурированного понимания компаниями, как соотно-

Рис. 1. Новые цифровые бизнес-модели вытесняют старые бизнес-модели
Fig. 1. New digital business models are replacing old ones



Источник: [Bughin et al., 2018].

ситься задачи цифровой трансформации с преобразованием бизнес-моделей [Schallmo et al., 2018]. Однако некоторым компаниям удастся приспособиться благодаря в первую очередь быстрой переориентации на нишевые рынки.

Интенсивное развитие производственных систем на основе внедрения комплекса технологий «умное производство» на текущем этапе осуществляется преимущественно компаниями-новаторами, как это предполагается моделью диффузии инноваций Роджерса: новаторы (2,5%), первые пользователи (13,5%), раннее большинство (34%), позднее большинство (34%), консерваторы (16%). Разумеется, модель диффузии инноваций в большей степени подчеркивает пользовательские аспекты со стороны потребителя, а не организационно-внедренческие. Тем не менее по сумме долей новаторов и ранних пользователей (16%) в этой модели можно относительно точно, хоть и обобщенно охарактеризовать текущий этап применения технологий умного производства в российской промышленности. Это достаточно хорошо соотносится с данными исследования «Цифровая экономика 2022», представленными в табл. 1 в контексте использования цифровых технологий в организациях по виду экономической деятельности [Цифровая экономика., 2022]. Особые важность и интерес теперь представляют скорость и полнота выхода на участки раннего и позднего большинства кривой Роджерса. При этом в исследованиях отмечается, что направления развития российских промышленных компаний соответствуют общемировым трендам, однако темпы реали-

Таблица 1
Использование цифровых технологий в организациях по видам экономической деятельности в 2020 году
(% от общего числа организаций)

Table 1
Use of digital technologies in organizations by type of economic activity in 2020 (% of the total number of organizations)

Отрасль	Облачные сервисы	Big Data	Цифровые платформы	IoT	AI	Роботы
Добыча полезных ископаемых	19,0	21,8	13,2	14,6	2,5	4,2
Обрабатывающая промышленность	27,1	26,5	16,0	15,8	3,6	17,2
Обеспечение энергией	19,4	23,7	16,6	15,9	3,3	2,0

Источник: составлено автором на основе [Цифровая экономика., 2022].

зации цифровых инициатив заметно отстают от темпов ведущих стран – по разным оценкам, от 5 до 10 лет [Цифровая трансформация отраслей..., 2021]. Этим и объясняется острота и срочность модернизационных задач, стоящих перед российскими промышленными предприятиями.

Концепция умного производства опирается на целый спектр передовых и перспективных технологий четвертой промышленной революции (индустрии 4.0), среди которых можно отметить в первую очередь виртуальное моделирование, большие данные (Big Data), облачные вычисления, искусственный интеллект (ИИ), интернет вещей (IoT), подключенную робототехнику, предиктивную аналитику, аддитивное производство и др. [Цифровая трансформация отраслей..., 2021]. Разнообразие большого конгломерата технологий умного производства в немалой степени предопределяет разнообразие социально-экономических эффектов от их внедрения.

Удачным и наглядным представляется обобщение основных тенденций развития производственно-логистических систем на основе внедрения технологий умного производства, предложенное О.В. Мясниковой (рис. 2).

Однако важно отметить, что темпы внедрения цифровых технологий зависят не только от развития технологий самих по себе. На аспект культурной и социальной трансформации обращают внимание Л. Берг и коллеги, говоря о пирамидальной структуре цифровой экономики (рис. 3), где фундаментальным слоем является культура, основанная на данных, или движимая данными культура (data-driven culture), под которой понимается культура готовности создавать и передавать данные по всей цепочке создания стоимости [Berg et al., 2020].

1. Три группы эффектов внедрения комплекса технологий умного производства

Общий социально-экономический эффект от внедрения комплекса технологий умного производства в промышленности и в экономике в целом характеризуется большой и довольно разнообразной совокупностью эффектов, ведущих к повышению эффективности работы предприятий, сокращению многих групп затрат и росту востребованности продукции и выручки, что в итоге сказывается на росте рентабельности. У научного и экспертного сообществ сложилось уже достаточно зрелое и доказательное представление о ряде центральных эффектов умного производства. Вместе с тем целый ряд специфических и более широких социально-экономических эффектов получают пока недостаточное внимание даже в ведущих изданиях по проблематике цифровой трансформации промышленных предприятий.

Среди социально-экономических эффектов комплекса технологий умного производства представляется наиболее целесообразным выделить три укрупненные группы эффектов. Первая по основному вектору действия приводит к снижению затрат. Вторая приводит преимущественно к повышению выручки: одни эффекты в большей степени в краткосрочном и среднесрочном периоде, другие – в долгосрочной перспективе, в том числе благодаря созданию

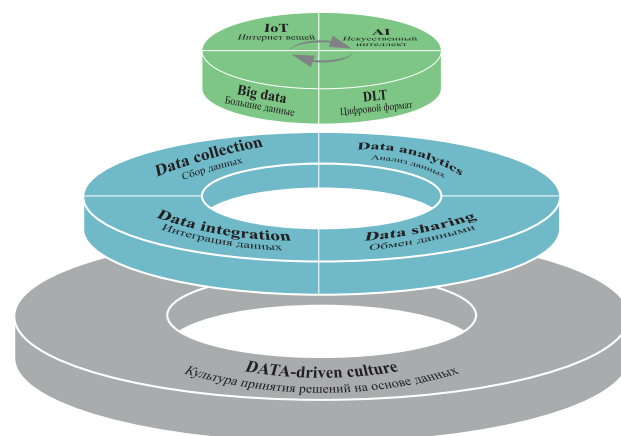
Рис. 2. Тенденции развития производственно-логистических систем
Fig. 2. Trends in the development of production and logistics systems



Источник: [Мясникова, 2020].

долгосрочных отличительных способностей, уникальных компетенций, устойчивых конкурентных преимуществ у промышленных компаний. Третья группа эффектов – это более широкие по фокусу воздействия социально-экономические эффекты от применения комплекса технологий умного производства, которые можно в целом охарактеризовать как имеющие мультипликативное воздействие для всей экономики и свойства положительных экстерналий (внешних эффектов). Такое разделение на три группы эффектов представляется целесообразным с точки зрения основного фокуса эффектов, однако вместе с тем необходимо отметить, что во многих контекстах применение комплекса технологий умного производства прямо или косвенно влияет и на издержки, и на будущий потенциал продаж компаний, и на мультипликаторы на уровне отрасли и всей экономики.

Рис. 3. Структурное представление цифровой экономики
Fig. 3. Structural representation of the digital economy



Источник: [Berg et al., 2020].

И границы между отдельными эффектами могут быть в некоторой степени размытыми.

Значимость систематизации эффектов в ракурсе разделения на три группы эффектов состоит в более полном и широком понимании потенциала комплекса технологий умного производства, что может положительно влиять на динамику внедрения и масштабирования как самих технологий, так и взаимосвязанных с ними моделей бизнеса. Это важно с точки зрения готовности и скорости принятия решений как самими промышленными предприятиями, так и другими стейкхолдерами, в том числе влияющими на инновационную, технологическую и промышленную политики государства.

2. Группа эффектов сокращения затрат промышленных предприятий

К группе эффектов комплекса технологий умного производства, которые преимущественно приводят к сокращению затрат, можно в первую очередь отнести следующие:

- *Сокращение затрат на контроль и мониторинг производственных процессов.* Инженеры по промышленному производству могут напрямую отслеживать и контролировать промышленные процессы с помощью интернета, что позволяет инженерам по управлению получать доступ к производственной системе из любого места через облачные вычисления. Киберфизическая система связывает вычислительные объекты с физическим миром и его текущими процессами, используя службы обработки данных, доступные непосредственно в интернете. В качестве примера можно привести компанию – производителя микрочипов и микроэлектроники *Micron*, которая создала одну из самых передовых интегрированных платформ для интернета вещей и аналитики. Эта платформа помогает компании в режиме реального времени отслеживать процессы и идентифицировать производственные аномалии и не создающие ценности потери, а также выполнять автоматический анализ причин такого рода несоответствий и аномалий. Как результат, ряд центральных операционных метрик улучшился на десятки процентов. В частности, запуск новых продуктов ускорился на 20%, а сокращение внеплановых простоев составило 30% [Lage, Filho, 2010].

- *Сокращение затрат на детали и комплектующие.* Аддитивное производство, также известное как технология 3D-печати, открывает новые горизонты для интеллектуальных производственных технологий. Технология аддитивного производства является чрезвычайно гибкой для настройки, быстрого прототипирования и быстрого изготовления запасных частей. Это также снижает время производственного цикла и затраты на замену станков [Lu, 2017]. Происходит также сокращение материалоемкости и снижение веса деталей. Современные продукты на умных фабриках производятся с помощью искусственного интеллекта. Системе на основе искусственного интеллекта можно задать исходные условия, и она сама проработает множество вариантов и выдаст готовые решения.

- *Более эффективное использование производственных мощностей за счет экосистемной интеграции всех элемен-*

тов, включая машинные. Благодаря интегральной и синергичной конфигурации умных производственных устройств в рамках единой цифровой технологической экосистемы успех выполнения производственного задания определяется общей готовностью всего оборудования. Кроме того, благодаря экосистемной интеграции обеспечивается высокий уровень адаптации производства к возникающим непредвиденным ситуациям [Касяненко и др., 2020].

- *Сокращение простоев, потерь и отходов.* Включенное в единую цифровую технологическую экосистему предприятие имеет четкое представление об узких местах, производительности машин и оборудования и о других неэффективных операциях. При помощи этих данных производитель может внести коррективы в процессы для сокращения потерь и отходов, а также для уменьшения доли времени простоев.

- *Сокращение затрат, связанных с выходом оборудования из строя.* Принцип Predictive Maintenance (предиктивное обслуживание оборудования) заключается в предвидении проблем и сбоев, их своевременном устранении [Carvalho et al., 2019]. Настройка цифрового двойника и использование большого количества датчиков машин, станков, оборудования и устройств [Kanawaday, Sane, 2017] позволяют вовремя распознавать неисправности и проводить ремонт, а также с меньшими погрешностями высчитывать предполагаемый запас ремонтных комплектов [Касяненко и др., 2020]. Более совершенный аппарат прогнозирования деятельности оборудования позволяет уменьшить временные и материальные затраты ремонтных работ и технического обслуживания, предотвратить незапланированные аварийные прерывания работы и в долгосрочной перспективе снизить капитальные расходы.

- *Сокращение затрат на обратный инжиниринг.* Аддитивное производство облегчает обратный инжиниринг любых деталей или продуктов с помощью 3D-сканирования и позволяет реконфигурировать дизайн и быстро воспроизводить для тестирования и проверки [Kang, 2016]. С точки зрения объективных удельных затрат аддитивные технологии оказываются менее дорогостоящими, чем традиционные [Барвинок и др., 2014]. К примеру, в авиастроении создание платформы быстрого моделирования может сократить время проектирования и проектной доработки на 20% [Хейфец, Чернова, 2019].

- *Оптимизация и информационная интеграция цепочек поставок.* В настоящее время особой перспективностью обладает концепция открытого управления цепочками поставок (Open Supply Chain Management, OSCM) как новая парадигма в эволюции SCM. Компании могут извлечь выгоду из интегрированных физических и концептуальных ресурсов для повышения эффективности и гибкости основных процессов цепочки поставок, включая снабжение, производство, дистрибуцию и маркетинг [Rahmanzadeh et al., 2022]. Поставки становятся более гибкими, поскольку поставщики коммуницируют со складами, автономным или полуавтономным транспортом и дронами в режиме реального времени. Также в цепочки включаются мобильные роботы и коботы (коллаборативные роботы) для автоматического выполнения задач доставки [Rovito, 2022].

- *Снижение потребления электроэнергии.* Ряд исследований показывает очень значительное сокращение потребления

электроэнергии при переходе к умному производству [Kumar et al., 2021]. К примеру, промышленные компании Германии смогли сократить потребление электроэнергии на 24% путем внедрения программы для автоматизации защиты на сервере CSF [Касяненко и др., 2020]. В то же время необходимо отметить, что интеллектуальным производственным системам потребуются огромные центры обработки данных для реализации и поддержки их сетевых потребностей. Центры обработки данных потребляют большое количество энергии, а ресурсы, необходимые для производства энергии, негативно влияют на окружающую среду. То, какие мощности центров обработки данных могут потребоваться в будущем, демонстрирует следующий пример. Поток данных, создаваемый двигателями и самолетами, также меняет предложения по обслуживанию и поддержке, которые могут предоставлять производители реактивных двигателей. Двигатели производят огромное количество информации. Один двигатель Boeing 737 производит 20 терабайт данных каждый час в полете. Таким образом, восьмичасовой перелет из Нью-Йорка в Лондон на самолете с двумя двигателями может сгенерировать около 320 терабайт данных [Mathai, 2015].

- *Снижение затрат на подготовку высококвалифицированных инженерных и рабочих специалистов.* Виртуальная и дополненная реальности уже достаточно широко применяются в производственных системах ведущих международных компаний для обучения молодых инженеров и выпускников технических вузов, которые не очень хорошо подготовлены к работе с производственными процессами. Опыт отраслевых лидеров показывает, что посредством умного производства выпускники и начинающие специалисты успешно знакомятся с производственным процессом, процессами механизации, системами устранения неполадок и технического обслуживания. И такая форма инструктажа и обучения оказывается по ряду центральных компетенций еще полезнее, чем теоретическое обучение в более академическом контексте [Moon et al., 2019]. По ряду параметров обучение новых сотрудников и тестирование продукта с демонстрацией различных условий в дополненной среде оказались более эффективными и экономящими время. Также можно ожидать большую вовлеченность и лояльность сотрудников в контексте использования технологий умного производства, повышение их креативности [Gajdzik, Wolniak, 2022], а также способности решать более сложные задачи с применением цифровых компетенций [Paelke, 2014; Иванов, 2016].

- *Сокращение времени и стоимости при проведении НИОКР.* Быстрая сборка опытных образцов помогает ускорить выпуск новой продукции, изделий различной модификации [Барвинок и др., 2014]. Быстрая и короткая связь с клиентами помогает быстрее реагировать на изменение их предпочтений и проводить тестирование новой продукции. Это позволяет сократить непроизводительные затраты в ходе инновационной деятельности [Hinz, 2013; Guneshka, 2021].

- *Сокращение безвозвратных затрат, поскольку адаптивность производства снижает значение фактора специфических активов.* Нередко специфические капитальные вложения, связанные со взаимодействием с определенными потребителями и поставщиками, характеризуются

ограниченной возможностью повторного использования полученных результатов. Оборудование, используемое для умного производства, обеспечивает более высокий уровень организации гибких линий и предоставляет возможность быстро и эффективно распределять производственные задачи между отдельными универсальными устройствами в зависимости от нагрузки и уровня готовности [Касяненко и др., 2020].

- *Сокращение потребности в оборотном капитале.* Сокращение потребности в оборотном капитале происходит в первую очередь из-за сокращения запасов и расширения возможностей получения полной или частичной предоплаты продукции со стороны покупателя [Matulik, 2008].

3. Группа эффектов повышения выручки промышленных предприятий

К группе эффектов, которые преимущественно ведут к повышению выручки, можно прежде всего отнести:

- *Улучшенное понимание покупательских привычек и требований.* В сегодняшних условиях производители хотят, чтобы их клиенты делились своими отзывами и личными мнениями о продуктах или планах использования. Исходя из этой информации производители концентрируют дизайн своей продукции, как правило, на удовлетворении потребностей относительно широкого круга клиентов [Ren et al., 2019]. Обработка большого количества данных помогает производителю определить текущее состояние продукта и причины сбоев, побуждая клиентов покупать его продукты, поскольку при проектировании и изготовлении были в более высокой степени учтены их покупательские привычки и требования. Анализ больших данных позволяет в полной мере использовать потенциал маркетинга на основе данных (data-driven marketing) в контексте производственной деятельности.

- *Более полное удовлетворение потребителей.* После анализа данных с разных этапов технологического процесса, используя компьютерное обучение и искусственный интеллект, производители становятся более гибкими и могут быстро изменять свои бизнес-модели в ответ на изменения во внешней среде. Благодаря аддитивному производству и обратному инжинирингу удастся достичь качественного скачка в ряде высокотехнологичных отраслей. К примеру, в медицинском производстве технологии аддитивного производства и обратного инжиниринга используются для имплантатов в стоматологии и ортопедии, чтобы заменить поврежденные части тела. Также схожие технологии используются для прототипирования, проектирования и испытаний конструкций в гражданском строительстве для обеспечения экономической эффективности и удовлетворенности клиентов. В данном случае моделирование и аддитивные технологии позволяют понять, как обеспечить наилучшее зонирование помещений [Negi et al., 2013]. Еще одним примером являются производители обуви Nike и Under Armour, которые изучают то, как аддитивное производство может произвести революцию в производстве обуви, что в конечном итоге позволит им адаптировать кроссовки к ноге каждого спортсмена.

• *Быстрая адаптация продукции под требования заказчика за счет гибкости производства.* Виртуальная и дополненная реальность помогают в цифровом производственном процессе визуализировать и тестировать продукты в смоделированной среде для конечных клиентов, что расширяет возможности настройки продукта на основе моделируемой среды для конечных клиентов [Berg, Vance, 2017]. Это ведет не только к сокращению ряда затрат [Riemer, Totz, 2003], но и повышает будущие продажи и рентабельность. Гибкость производства подразумевает техническую и организационную возможность быстрой переналадки оборудования в рамках новых задач с учетом требований заказчиков и потребителей финального продукта [Глазков, 2016].

• *Возможность изготовления малых серий специфических модификаций продуктов и деталей.* Повышение адаптивности к изменению спроса и скорости запуска новой номенклатуры в производство предоставляет новые сбытовые возможности и преимущества как для крупных, так и малых и средних инновационных предприятий [Барвинок и др., 2014]. Развивающиеся распределенные производственные системы, заменяющие классические иерархические режимы управления, очень важны для реализации интеллектуальной производственной системы, которая может справляться с растущими потребностями в настройке, внезапными колебаниями цепочки поставок, а также подходит для небольших производственных партий [Lu et al., 2016].

• *Повышение качества выпускаемой продукции, снижение производственного брака.* Все оборудование, ведущее наблюдение и контроль на производстве, работает в режиме реального времени. Большие данные активно используются для повышения качества выпускаемой продукции и поиска дефектов в процессе производства. Наличие такого инструмента, как мониторинг рабочих операций, позволяет повысить эффективность работы сотрудников. У специалистов по мониторингу операций и процессов имеется возможность просматривать данные автоматически через заданные интервалы времени на ключевых индикаторах и панелях управления, чтобы улучшить контроль над производственным процессом и качеством продукции, снизить количество материалов для производства, сократить время использования ресурсов и т.д. Немаловажно и то, что стандартизация сбора данных также позволит сравнивать эффективность различных производственных объектов, подразделений, сборочных линий [Баурина, 2020].

• *Увеличение цен и маржинальности продукции за счет фактора монополистической конкуренции.* Экономическая природа умного производства с точки зрения отраслевой экономики состоит в более выраженной структуре рынка монополистической конкуренции. Это в свою очередь означает, что все больше промышленных компаний благодаря внедрению комплекса технологий «умное производство» могут обеспечить себе такую дифференциацию, которая будет признана рынком и в части роста потенциала роста продаж, и в части достижения высокой рентабельности направлений бизнеса.

• *Сокращение для потребителей полной стоимости владения сложными техническими изделиями на этапе сопровождения продукта (цифрового сервиса).* Путем опти-

мизации процесса инженерных изменений, особенно в контексте производства сложных изделий, а также благодаря цифровым сервисам на этапе сопровождения можно снизить совокупную стоимость владения. И в B2B, и в B2C сегментах это становится одним из центральных конкурентных преимуществ и может быть использовано в ходе маркетинговых компаний. При этом компоненты цифрового сервиса во многих отраслях могут оказываться более высоко маржинальными, чем сопровождаемый продукт. Такой подход в ряде случаев меняет ландшафт целых отраслей. Вероятно, самый известный и масштабный пример такого рода – компания *Apple*, у которой доля выручки и прибыли от сервисов (в рамках экосистемы программ) в последние годы растет, а «аппаратная» составляющая сокращается.

• *Увеличение срока ожидания поставки за счет предоставления более инновационного продукта.* Клиенты, заказавшие под свою спецификацию инновационный продукт, готовы в среднем ожидать его дольше, что приводит к снижению потерь выручки, а также к сокращению ошибок в цепи поставок, которые вызваны ускоренной сборкой изделий [Piller et al., 2004].

4. Группа эффектов мультипликативного действия и положительных экстерналий от внедрения технологий умного производства

К группе более широких социально-экономических эффектов от применения комплекса технологий «умное производство», которые можно в целом охарактеризовать как имеющие мультипликативный эффект для всей экономики, а также воздействие в качестве положительных экстерналий (внешних эффектов), можно в первую очередь отнести:

• *Рост рынка полупроводниковой электроники и промышленного оборудования.* Данный рост сопровождается развитием технологий, которые основаны на применении полупроводниковой электроники. Вместе с тем возникают дисбалансы и отраслевые кризисы по причине нехватки электроники или оборудования, как это произошло в автомобильной промышленности в 2020–2022 годах в связи с хроническим дефицитом микроэлектронных комплектующих [Щербаков, 2022].

• *Повышение уровня наукоемкости и технологичности продукции и сервисов в смежных отраслях.* Внедрение комплекса технологий «умное производство» становится драйвером научно-технологического развития не только в лидирующих отраслях, но и в смежных [Цифровая Россия: новая реальность, 2017] и ведет к более высокому уровню производственной эффективности, которая характеризуется такими индикаторами, как уровень инновационной активности, доля высокотехнологичной продукции в ВВП, доля затрат на НИОКР в ВВП. Более того, интеграционная модель сквозной цифровой трансформации промышленности на основании матричной и отраслевой моделей позволяет в условиях цифровой экономики выстраивать интеграционную межотраслевую цифровую сеть, в рамках которой происходит сквозная цифровизация всех отраслей народного хозяйства

на основе общих сегментов цифровой инфраструктуры и организация функциональных взаимодействий между ними [Зубрицкая, 2018].

- *Интенсификация развития прикладной науки, особенно технической и инженерной.* Более полная система интеграции научной, технической и индустриальной подсистем становится необходимой для инновационного развития страны и индустрии 4.0. Умное производство, по мнению ряда исследователей, оказывается одним из самых подходящих ландшафтов для внедрения открытых инноваций [Rahmanzadeh et al., 2022].

- *Изменение структуры занятости от низкоквалифицированных в пользу высококвалифицированных рабочих мест.* Магистральным эффектом с точки зрения качества человеческого капитала промышленных предприятий является и то, что автоматизация позволяет производителям запускать и завершать проекты с минимальным количеством низкоквалифицированных работников. Более быстрый доступ дает возможность сотрудникам с более высокой квалификацией сосредоточиться только на своих основных задачах. Это позволяет производителям внедрять инновационные технологии быстрее, не затрачивая на это дополнительные ресурсы. Несомненно, большой научно-практический интерес и особую социально-экономическую значимость представляет вопрос о том, в какой степени умное производство будет генерировать высококвалифицированные рабочие места, чтобы покрыть выбытие большого количества профессий, которые становятся ненужными на умных производствах. Несмотря на немалую дискуссионность вопроса и различные оценки, включая консервативные и пессимистичные, усредненные оценки обнадеживают [Jagannathan et al., 2019; Grenčíková et al., 2020; Anackovski et al., 2021], особенно если воспринимать общее сокращение рабочих человеко-часов на высокотехнологичных производствах в рамках общеэкономического тренда на сокращение рабочей недели. В тех странах, в которых уже произошла в той или иной степени институционализация сокращенной рабочей недели (например, в Германии, Австрии, Франции, где рабочая неделя на промышленных предприятиях составляет около 33 часов), автоматизация воспринимается не враждебно, а с пониманием ее долгосрочных выгод с точки зрения качества жизни персонала предприятий.

- *Повышение спроса на IT-специалистов.* Данную профессиональную группу в расширительном определении стоит выделить отдельно, поскольку ее увеличение в последние несколько лет стало крайне значимым приоритетом государственной политики в области занятости, образования и переподготовки кадров во многих странах, включая Россию. Дальнейшее развитие и внедрение интеллектуальных производственных систем создаст дополнительный спрос на специалистов по информационным технологиям. Сектору информационных технологий потребуются квалифицированные люди для проектирования, разработки, запуска и обслуживания сетевых программ. Таким образом, будет расти количество рабочих мест в сфере информационных технологий. Однако на производственных предприятиях операторы низкой квалификации и другие работники рискуют потерять работу.

- *Повышение производительности труда в промышленности и в экономике в целом.* Данный эффект в значительной степени является производным от смещения занятости в умной промышленности и резкого сокращения задействования работников с низкой квалификацией. Однако необходимо отметить и другие составляющие, благодаря которым данный эффект оказывается более выраженным и системным в рамках парадигмы умного производства. На предприятиях создаются отдельные системы управления производительностью [Багаутдинова, Багаутдинова, 2018].

- *Снижение экономического и социального ущерба от несоблюдения техники безопасности.* Ряд технологий умного производства, в особенности компьютерное зрение, позволяет не только оптимизировать процессы, но также на новом уровне контролировать действия и операции персонала в части выполнения требований техники безопасности [Тарасова, Шпарова, 2021; Rovito, 2022]. Однако дело не только в эффективном контроле, но и в том, что комплекс технологий «умное производство» позволяет уже в рамках дизайна рабочих мест обеспечивать самую высокую приоритизацию безопасности на рабочем месте. Исследования эффекта снижения травматизации работников и улучшения их общего благополучия и качества жизни представляют особый интерес. В условиях деятельности российских промышленных предприятий это особенно важно, поскольку до сих пор в большинстве отраслей уровни травматизации работников и условий труда с точки зрения угроз здоровью затруднительно назвать удовлетворительными, если учитывать уже имеющийся потенциал применения высоких технологий. Приведем ряд примеров по частным технологиям умного производства, которые вывели безопасность на рабочем месте на новый уровень. Первым примером является прогресс в роботизированной среде, когда благодаря ряду технологий биометрические данные оператора также включаются в контур управления. Благодаря этому можно реализовать персонализированную стратегию безопасности, основанную на роли человека, физического состояния, скорости и иных параметров [Wang, Wang, 2020]. Вторым примером служит то, что ряд умных технологий, особенно дополненная реальность, улучшает качество тренингов по технике безопасности [Deac et al., 2017]. В качестве третьего примера стоит отметить разрабатываемые динамические самоорганизующиеся системы безопасности с целью помочь инженеру, работающему на интеллектуальном производственном объекте, обнаруживать все устройства, связанные с безопасностью, и автоматически генерировать подходящую конфигурацию безопасности. Эта конфигурация будет развернута в системе автоматически после адаптации и проверки инженером по технике безопасности. Предлагаемая самоорганизующаяся система безопасности упрощает конфигурацию безопасности в динамично изменяющейся среде. Следовательно, это не только повышает уровень безопасности на рабочем месте, но и уменьшает инженерные усилия и время простоя оборудования, что в свою очередь повышает рентабельность [Etz et al., 2020].

- *Более широкий переход отраслей и секторов экономики на бизнес-модели PaaS (Product as a Service, продукт как ус-*

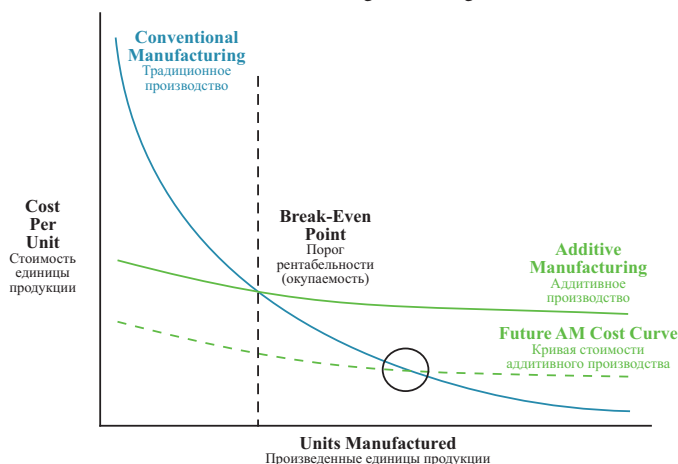
дуга). На первый взгляд это, вероятно, может показаться несколько контринтуитивным, однако комплекс технологий «умное производство» стимулирует не только собственное инновационные технологические и продуктовые составляющие в промышленности, но также более интегральное и холистичное включение сервисных компонентов в общую продуктовую оболочку, особенно сервисы с высоким уровнем цифровизации. Это особенно важно и для конкурентоспособности российских промышленных предприятий, и для маржинальности их бизнеса. Сервисные компоненты являются в среднем более рентабельными. Умное производство создает гораздо большее разнообразие ниш для построения новых бизнес-моделей, таких как подписка с ежемесячной оплатой вместо продажи оборудования (также известная как «продукт как услуга»).

- *Повышение доли средних и малых предприятий в объеме промышленного производства.* Данный эффект в значительной степени зависит от контекстов отдельных отраслей и в большинстве случаев не должен быть самоцелью. Тем не менее многие эксперты отмечают, что для многих отраслей российской промышленности характерна высокая концентрация крупных производств и что она не соответствует параметрам прогрессивной отраслевой структуры. Повышение адаптивности к изменению спроса и скорости запуска новой номенклатуры как одно из центральных преимуществ комплекса технологий «умное производство» предоставляет новые сбытовые возможности и преимущества как для крупных, так и малых и средних инновационных предприятий [Барвинок, Смелов, Кокарева, Малыхин, 2014]. Графически преимущество от внедрения цифровых технологий (в первую очередь аддитивного производства) для малых и средних промышленных компаний изображено на рис. 4. По мере того, как технология аддитивного производства становится все более универсальной с точки зрения материалов, размеров деталей и надежности, а также по мере того, как все больше компаний выходят на рынок 3D-принтеров, цены падают. Небольшие 3D-принтеры для хобби от таких компаний, как *MakerBot*, доступны менее чем за 3000 долл. Принтеры промышленного масштаба, использующие полимеры или керамику, стоят менее 95 000 долл., а принтеры, использующие металлы, – около 400 000 долл. Однако новые машины от *Desktop Metal* и *HP* обещают значительно снизить уровни цен [Mahoney, Kota, 2020].

- *Повышение инвестиционной активности предприятий, включая малые и средние.* Рост инвестиций можно ожидать во все виды основных фондов (машины для 3D-печати), нематериальные активы (программное обеспечение, лицензии, патент) и исследовательские разработки. Тем не менее эмпирические исследования малых и средних предприятий показывают, что они имеют неустойчивое поведение с точки зрения инвестиций в информационно-коммуникационные технологии и нуждаются во внешней поддержке для интеграции цифровых преобразований в общую стратегию фирмы [Ulas, 2019]. Однако дело не только в поддержке, но и в понимании потенциала технологий умного производства, в том числе для оценки инвестиционной целесообразности различных решений. Особенно в этом отноше-

Рис. 4. Перспективы снижения удельных затрат малых и средних производителей благодаря удешевлению технологий аддитивного производства

Fig. 4. Prospects for reducing the unit costs of small and medium-sized manufacturers through the reduction in the cost of additive manufacturing technologies



Источник: [Mahoney, Kota, 2020].

нии полезны технологии цифровых двойников. Технологии цифровых двойников используются для сбора информации для реалистичной экономической оценки решений полной автоматизации, для поддержки и поощрения инвестиций для реализации потенциала цифровой трансформации производства. Технологии включают моделирование, анализ данных и поведенческие модели, которые используются для оценки воздействия, сценариев имплементации, устранения необходимости в физических прототипах, сокращения времени разработки и повышения качества [Cassamo, 2022]. Также в недавнем исследовании с учетом проблем деятельности малых и средних предприятий в условиях высокой неопределенности процессов цифровой трансформации была предложена модификация метода картирования потока создания ценности (value stream mapping method, VSM) для оценки интеллектуальных производственных решений, в которой акцент сделан на информационные потоки и интеграцию необходимых ключевых показателей эффективности [Martin, 2020].

- *Повышение качества и прозрачности менеджмента.* Технологические и организационные инновации происходят как последовательно, так и одновременно и дополняют друг друга в условиях перехода на умное производство. Взаимодействие между двумя типами инноваций является сложным. Большинство производителей имеют старые системы сбора и обработки информации. Новые системы должны обновляться до следующего поколения производительности. На основе этих новых идей и лучшего понимания бизнеса становится возможной разработка новых стратегий [Баурина, 2020].

- *Улучшение корпоративного руководства и ESG-факторов в промышленных компаниях.* Несмотря на важность трансформации корпораций в сторону индустрии 4.0 (Corporate Transformation Toward Industry 4.0, СТТ4.0), на сегодняшний день исследования относительно того, как компании сообщают информацию СТТ4.0 в своих го-

довых отчетах и как это влияет на финансовые показатели, малочисленны. Однако в недавних первых работах [Alkaraan et al., 2022] в данной области было установлено, что раскрытие информации по СТТИ4.0 оказывает положительное влияние на финансовые показатели промышленных компаний. Кроме того, было обнаружено, что экологические, социальные и управленческие практики (ESG) благоприятно влияют на взаимосвязь между раскрытием информации СТТИ4.0 и финансовыми показателями.

• *Повышение экологической устойчивости производств.* Благодаря интеллектуальному управлению всем производственным процессом интеллектуальные производственные системы сокращают отходы, перепроизводство и потребление

энергии. Производственная система автоматически заказывает материал или детали у своих поставщиков, когда это необходимо. Во времена более низких объемов продаж заказывается меньше сырья. Другим примером экологической устойчивости является то, что компании-производители связаны с электростанциями и могут планировать энергоемкие задачи при естественном перепроизводстве энергии за счет энергии ветра или солнца. Излишки энергии могут быть использованы другими компаниями или частными домохозяйствами в ближайших окрестностях. Благодаря интеллектуальным системам управления энергопотреблением и сетевым технологиям возобновляемые источники энергии могут использоваться более эффективно.

Таблица 2
Систематизация социально-экономических эффектов внедрения технологий умного производства
Table 2
Systematization of the socio-economic effects from the implementation of smart production technologies

Эффекты сокращения затрат	Эффекты повышения выручки	Мультипликативные эффекты и положительные внешние эффекты
Сокращение затрат на контроль и мониторинг производственных процессов	Улучшенное понимание покупательских привычек и требований	Рост рынка полупроводниковой электроники и промышленного оборудования
Сокращение затрат на детали и комплектующие	Более полное удовлетворение потребителей	Повышение уровня наукоемкости и технологичности продукции и сервисов в смежных отраслях
Более эффективное использование производственных мощностей за счет экосистемной интеграции	Быстрая адаптация продукции под требования заказчика за счет гибкости производства	Интенсификация развития прикладной науки, особенно технической и инженерной
Сокращение простоев, потерь и отходов	Возможность изготовления малых серий специфических модификаций продуктов и деталей	Изменение структуры занятости в сторону высококвалифицированных рабочих мест
Сокращение затрат, связанных с выходом оборудования из строя	Повышение качества выпускаемой продукции, снижение производственного брака	Повышение спроса на IT-специалистов
Сокращение затрат на обратный инжиниринг	Увеличение цен и маржинальности продукции за счет фактора монополистической конкуренции	Повышение производительности труда в промышленности и в экономике в целом
Оптимизация и информационная интеграция цепочек поставок	Сокращение для потребителей полной стоимости владения сложными техническими изделиями на этапе цифрового сервиса	Снижение экономического и социального ущерба от несоблюдения техники безопасности
Снижение потребления электроэнергии	Увеличение срока ожидания поставки за счет предоставления более инновационного продукта	Более широкий переход отраслей и секторов экономики на бизнес-модели PaaS
Снижение затрат на подготовку высококвалифицированных инженерных и рабочих специалистов		Повышение доли средних и малых предприятий в объеме промышленного производства
Сокращение времени и стоимости при проведении НИОКР		Повышение инвестиционной активности предприятий
Сокращение безвозвратных затрат за счет снижения значимости фактора специфических активов		Повышение качества и прозрачности менеджмента
Сокращение потребности в оборотном капитале		Улучшение корпоративного руководства и ESG-факторов в промышленных компаниях
Повышение экологической устойчивости производств		

Источник: составлено автором.

5. Систематизация социально-экономических эффектов внедрения технологий умного производства в табличном виде

Представляется целесообразным представить выделенные выше социально-экономические эффекты внедрения технологий умного производства по трем группам в табличном виде (табл. 2.). Некоторые расширенные заголовки эффектов были сокращены для удобства табличного представления.

6. Выводы и возможные направления дальнейших исследований

В результате проведенного исследования обобщены и выделены 12 эффектов сокращения затрат, 8 эффектов повышения выручки и 13 эффектов мультипликативного действия и характера положительных внешних эффектов от внедрения комплекса технологий умного производства на промышленных предприятиях. Особую важность в настоящее время имеют направления исследования социально-экономических эффектов внедрения технологий умного производства, поскольку некоторые улучшения на стыке производства и социальной трансформации являются в на-

стоящее время недостаточно изученными, в отличие от собственно производственных эффектов, многие из которых научное и экспертное сообщества исследовали достаточно подробно.

Как представляется, систематизация, классификация, разграничение и количественная оценка различных эффектов комплекса «умное производство» могут и даже в некотором смысле (в контексте задач модернизации экономики и промышленности Российской Федерации) должны стать отдельной предметной областью на стыке управления эффективностью (Performance Management) и умного производства (Smart Manufacturing). Отдельного внимания может заслуживать вопрос о целесообразности и перспективности построения некоего композитного индекса уровня зрелости и/или результативности внедрения технологий умного производства на уровне промышленности или отдельных отраслей и секторов.

С точки зрения государственной промышленной политики важно понимать приоритетность обеспечения более широкого применения комплекса технологий умного производства. Инструменты государственной промышленной политики и благоприятная институциональная среда способны помочь с быстрым масштабированием комплекса технологий умного производства по широкому кругу предприятий в различных отраслях и секторах экономики.

Литература

- Багаутдинова Н.Г., Багаутдинова Р.А. (2018). Новые конкурентные преимущества в условиях цифровизации. *Инновации*, 8: 80–83.
- Барвинок В.А., Смелов В.Г., Кокарева В.В., Малыхин А.Н. (2014). Прогрессивные технологии в машиностроении. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 4: 142–149.
- Баурина С.Б. (2020). Технологии будущего: умные производства в промышленности. *Вестник РЭУ им. Г.В. Плеханова*, 17(2): 123–132. DOI: <http://dx.doi.org/10.21686/2413-2829-2020-2-123-132>
- Глазков Б. (2016). Возможности индустриального интернета. *Трамплин к успеху*, 7: 24–27.
- Зубрицкая И.А. (2018). Цифровая трансформация промышленных предприятий Республики Беларусь: экономическое содержание, виды и цели. *Цифровая трансформация*, (3): 5–13.
- Иванов Д. (2016). Испытательный полигон для передовых производственных технологий. *Трамплин к успеху*, 7: 14–16.
- Касяненко Е.О., Шимченко А.В., Салкуцан С.В. (2020). Сравнительный анализ традиционной модели производства и «умных фабрик». *Журнал правовых и экономических исследований*, 3: 7–17.
- Мерзликина Г.С. (2021). Экономическая эффективность «Умного производства»: от целевых установок к регламентации. *Вестник АГТУ. Экономика*, 3.
- Мясникова О.В. (2020). Теоретико-концептуальные подходы к формированию производственно-логистической системы «умного» производства как социкиберфизической системы. *Экономика. Управление. Инновации*, 1(7): 29–35.
- Тарасова Н.Н., Шпарова П.О. (2021). *Топ-15 цифровых технологий в промышленности*. <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/494926392.pdf>.
- Титов С.А., Титова Н.В. (2022). Оценка экономических эффектов от кастомизации продукции российских промышленных предприятий. *Стратегические решения и риск-менеджмент*, 13(1): 26–36. DOI: 10.17747/2618-947X-2022-1-26-36.
- Трачук А.В., Линдер Н.В., Тарасов И.В., Налбандян Г.Г., Ховалова Т.В., Кондратюк Т.В., Попов Н.А. (2018). *Трансформация промышленности в условиях четвертой промышленной революции: монография*. СПб.: Реальная экономика.
- Трачук А.В., Линдер Н.В. (2020). Влияние технологий индустрии 4.0 на повышение производительности и трансформацию инновационного поведения промышленных компаний. *Стратегические решения и риск-менеджмент*, 2(11): 132–149.
- Хейфец Б.А., Чернова В.Ю. (2019). Зарубежные программы умной реиндустриализации. *ЭКО*, 8: 118–140. DOI: 10.30680/ЕСО0131-7652-2019-8-118-140.

Цифровая Россия: новая реальность (2017). Digital McKinsey. https://www.mckinsey.com/ru/~/_media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/russia/our%20insights/digital%20russia/digital-russia-report.pdf.

Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты (2021). М.: НИУ ВШЭ. <https://conf.hse.ru/mirror/pubs/share/463148459.pdf?ysclid=l2yt4ijpgh>.

Цифровая экономика 2022: краткий статистический сборник (2022). М.: НИУ ВШЭ. <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/552091260.pdf>.

Щербakov Г.А. (2022). Глобальный дефицит полупроводниковых компонентов как источник современного кризиса мировой автомобильной промышленности. *МИР (Модернизация. Инновации. Развитие)*, 13(2): 270–287. <https://doi.org/10.18184/2079-4665.2022.13.2.270-287>.

Alkaraan F., Albitar K., Hussainey K., Venkatesh V.G. (2022). Corporate transformation toward Industry 4.0 and financial performance: The influence of environmental, social, and governance (ESG). *Technological Forecasting and Social Change*, 175: 121423. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121423>.

Anackovski F., Kostov M., Pasic R., Kuzmanov I. (2021). The impact of Industry 4.0 on education and future jobs (2021). In: *56th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST)*: 185–188. DOI: 10.1109/ICEST52640.2021.9483516.

Berg H., Le Blévenec K., Kristoffersen E., Strée B., Witomski A., Stein N., Bastein T., Ramesohl S., Vrancken K. (2020). *Digital circular economy as a cornerstone of a sustainable European industry transformation*. European Circular Economy Research Alliance (ECERA). <https://ss-usa.s3.amazonaws.com/c/308476495/media/19365f987b483ce0e33946231383231/201023%20ECERA%20White%20Paper%20on%20Digital%20circular%20economy.pdf>.

Berg L.P., Vance J.M. (2017). Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: A survey. *Virtual Reality*, 21(1): 1–17.

Bughin J., Catlin T., Hirt M., Willmott P. (2018). Why digital strategies fail. *McKinsey Quarterly*, Jan.

Caccamo C., Pedrazzoli P., Eleftheriadis R., Magnanini M.C. (2022). Using the process digital twin as a tool for companies to evaluate the return on investment of manufacturing automation. *Procedia CIRP*, 107: 724–728. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.052>.

Carvalho T.P., Soares F.A., Vita R., Francisco R.P., Basto J.P., Alcalá S.G. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137: 106024. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>.

Deac C.N., Popa C.L., Ghinea M., Cotet C.E. (2017). Using augmented reality in smart manufacturing. In: *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*: 0727–0732. Vienna, DAAAM International. 10.2507/28th.daaam.proceedings.102

Etz D., Frühwirth T., Kastner W. (2020). Flexible safety systems for smart manufacturing. In: *25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*: 1123–1126. DOI: 10.1109/ETFA46521.2020.9211905.

Gajdzik B., Wolniak R. (2022). Smart production workers in terms of creativity and innovation: The implication for open innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8(2): 68. <https://doi.org/10.3390/joitmc8020068>.

Geerts R. (2016). The smart manufacturing elevator pitch, literally! *MESA International's*. <https://blog.mesa.org/2016/03/the-smart-manufacturing-elevator-pitch.html>.

Grenčíková A., Kordoš M., Berkovič V. (2020). The impact of Industry 4.0 on jobs creation within the small and medium-sized enterprises and family businesses in Slovakia. *Administrative Sciences*, 10(3): 71. <https://doi.org/10.3390/admsci10030071>.

Guneshka D. (2021). *Benefits of product personalization*. <https://www.iplabs.de/en/blog/blog/benefits-of-product-personalization>.

Hinz P. (2013). *Effects of mass customization on manufacturing*. <https://www.adaptalift.com.au/blog/2013-06-17-effects-of-mass-customisation-on-manufacturing>.

Jagannathan S., Ra S., Maclean R. (2019). Dominant recent trends impacting on jobs and labor markets – an overview. *International Journal of Training Research*, 17(sup1): 1–11. DOI: 10.1080/14480220.2019.1641292.

Kanawaday A., Sane A. (2017). Machine learning for predictive maintenance of industrial machines using iot sensor data. In: *8th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*, IEEE: 87–90. <https://doi.org/10.1109/ICSESS.2017.8342870>.

Kang H.S. (2016). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology*, 3(1): 111–128.

Kumar M., Shenbagaraman V.M., Shaw R.N., Ghosh A. (2021). Predictive data analysis for energy management of a smart factory leading to sustainability. In: Favorskaya M.N., Mekhilef S., Pandey R.K., Singh N. (eds.). *Innovations in electrical and electronic engineering. Lecture notes in electrical engineering*, 661. Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4692-1_58.

Lage M.J., Filho M.G. (2010). Variations of the Kanban system: Literature review and classification. *International Journal of Production Economics*, 125(1): 13–21.

- Lu Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6: 1–10.
- Lu Y., Morris K.C., Frechette S. (2016). Current standards landscape for smart manufacturing systems. *National Institute of Standards and Technology*, 8107.
- Mahoney T.C., Kota S. (2020). *Smart manufacturing: Premier for small manufacturers*, March. Report MF-TR-2020-0301. www.MForesight.org.
- Martin N.L., Dér A., Herrmann C., Thiede S. (2020). Assessment of smart manufacturing solutions based on extended value stream mapping. *Procedia CIRP*, 93: 371–376. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.019>.
- Mathai P. (2015). *Big data: Catalyzing performance in manufacturing*. Wipro, Jan., 8. <http://www.wipro.com/documents/Big%20Data.pdf>.
- Matulik P. (2008). *Mass customization*. Zlin: Tomas Bata University. http://195.178.95.140:8080/bitstream/handle/10563/6523/matul%C3%ADk_2008_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Moon S., Becerik-Gerber B., Soibelman L. (2019). Virtual learning for workers in robot deployed construction sites. In: *Advances in informatics and computing in civil and construction engineering*. Proceedings of the 35th CIB W78 2018 Conference: IT in Design, Construction, and Management. Springer, 889–895.
- Negi S., Dhiman S., Sharma R.K. (2013). Basics, applications and future of additive manufacturing technologies: A review. *Journal of Manufacturing Technology Research*, 5(1/2): 75.
- Odważny F., Szymańska O., Cyplik P. (2018). Smart factory: The requirements for implementation of the Industry 4.0 solutions in FMCG environment-case study. *LogForum*, 14(2): 257–267. <http://doi.org/10.17270/J.LOG.2018.253>.
- Paelke V. (2014). Augmented reality in the smart factory: Supporting workers in an Industry 4.0. environment. In: *Proceedings of the 2014 IEEE emerging technology and factory automation (ETFA)*, IEEE, 1–4.
- Phuyal S., Bista D., Bista R. (2020a). Challenges, opportunities and future directions of smart manufacturing: A state of art review. *Sustainable Futures*, 2: 100023. <https://doi.org/10.1016/j.sft.2020.100023>.
- Phuyal S., Bista D., Izykowski J., Bista R. (2020b). Design and implementation of cost-efficient SCADA system for industrial automation. *International Journal of Engineering and Manufacturing*, 10(2): 15–28. [10.5815/ijem.2020.02.02](https://doi.org/10.5815/ijem.2020.02.02).
- Piller F.T., Moeslein K., Stotko C.M. (2004). Does mass customization pay? An economic approach to evaluate customer integration. *Production Planning & Control*, 15(4): 435–444. [doi:10.1080/0953728042000238773](https://doi.org/10.1080/0953728042000238773).
- Rahmanzadeh S., Pishvae M.S., Govindan K. (2022). Emergence of open supply chain management: the role of open innovation in the future smart industry using digital twin network. *Annals of Operations Research*, preprint. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04254-2>.
- Ren S., Zhang Y., Liu Y., Sakao T., Huisingh D., Almeida C.M. (2019). A comprehensive review of big data analytics throughout product lifecycle to support sustainable smart manufacturing: A framework, challenges and future research directions. *Journal of Cleaner Production*, 210: 1343–1365.
- Riemer K., Totz C. (2003). The many faces of personalization. In: *The Customer Centric Enterprise*: 35–50. Berlin; Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Rovito M. (2022). *Smart manufacturing: The future of making is digital*. <https://redshift.autodesk.com/smart-manufacturing/>.
- Schallmo D., Williams C.A., Boardman L. (2018). Digital transformation of business models-best practice, enabler, and roadmap. *International Journal of Innovation Management*, 21(8): 1740014. https://doi.org/10.1142/9781786347602_0005.
- Strozzi F., Colicchia C., Creazza A., Noè C. (2017). Literature review on the ‘Smart Factory’ concept using bibliometric tools. *International Journal of Production Research*, 55(22): 6572–6591. <http://doi.org/10.1080/00207543.2017.1326643>.
- Ulas D. (2019). Digital transformation process and SMEs. *Procedia Computer Science*, 158: 662–671. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.101>.
- Wang X.V., Wang L. (2020). Safety strategy in the smart manufacturing system: A human robot collaboration case study. In: *Proceedings of the ASME 2020 15th International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 2: Manufacturing Processes; Manufacturing Systems; Nano/Micro/Meso Manufacturing; Quality and Reliability. September 3. V002T07A026. ASME. <https://doi.org/10.1115/MSEC2020-8427>.

References

- Bagautdinova N.G., Bagautdinova R.A. (2018). New competitive advantages in the context of digitalization. *Innovation*, 8: 80-83. (In Russ.)
- Barvinok V.A., Smelov V.G., Kokareva V.V., Malykhin A.N. (2014). Progressive technologies in mechanical engineering. *Problems of Mechanical Engineering and Automation*, 4: 142-149. (In Russ.)

- Baurina S.B. (2020). Technologies of the future: smart manufacturing in industry. *Bulletin of the Russian University of Economics G.V. Plekhanov*, 17(2): 123-132. DOI: <http://dx.doi.org/10.21686/2413-2829-2020-2-123-132>. (In Russ.)
- Glazkov B. (2016). The possibilities of the industrial Internet. *Springboard to Success*, 7: 24-27. (In Russ.)
- Zubritskaya I.A. (2018). Digital transformation of industrial enterprises of the Republic of Belarus: Economic content, types and goals. *Digital Transformation*, (3): 5-13. (In Russ.)
- Ivanov D. (2016). A testing ground for advanced manufacturing technologies. *Springboard to Success*, 7: 14-16. (In Russ.)
- Kasyanenko E.O., Shimchenko A.V., Salkutsan S.V. (2020). Comparative analysis of the traditional production model and “smart factories”. *Journal of Legal and Economic Studies*, 3: 7-17. (In Russ.)
- Merzlikina G.S. (2021). Economic efficiency of “smart production”: From targets to regulation. *Bulletin of ASTU. Economy*, 3. (In Russ.)
- Myasnikova O.V. (2020). Theoretical and conceptual approaches to the formation of the production and logistics system of “smart” production as a socio-cyber-physical system. *Economy. Control. Innovation*, 1(7): 29-35. (In Russ.)
- Tarasova N.N., Shparova P.O. (2021). *Top 15 digital technologies in the industry*. <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/494926392.pdf>. (In Russ.)
- Titov S.A., Titova N.V. (2022). Estimation of economic effects from customization of products of Russian industrial enterprises. *Strategic Decisions and Risk Management*, 13(1): 26-36. DOI: 10.17747/2618-947X-2022-1-26-36. (In Russ.)
- Trachuk A.V., Linder N.V., Tarasov I.V., Nalbandyan G.G., Khovalova T.V., Kondratyuk T.V., Popov N.A. (2018). *Transformation of industry in the conditions of the fourth industrial revolution: monograph*. St. Petersburg, Real'naya ekonomika. (In Russ.)
- Trachuk A.V., Linder N.V. (2020). The impact of industry 4.0 technologies on increasing productivity and transforming the innovative behavior of industrial companies. *Strategic Decisions and Risk Management*, 2(11): 132-149. (In Russ.)
- Kheifets B.A., Chernova V.Yu. (2019). Foreign programs of smart reindustrialization. *ECO*, 8: 118-140. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2019-8-118-140. (In Russ.)
- Digital Russia: A new reality* (2017). Digital McKinsey. https://www.mckinsey.com/ru/~/_media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/russia/our%20insights/digital%20russia/digital-russia-report.pdf. (In Russ.)
- Digital transformation of industries: Starting conditions and priorities* (2021). Moscow, NRU HSE. <https://conf.hse.ru/mirror/pubs/share/463148459.pdf?ysclid=l2yt4ijpg>. (In Russ.)
- Digital economy 2022: A brief statistical compendium* (2022). Moscow, NRU HSE. <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/552091260.pdf>. (In Russ.)
- Shcherbakov G.A. (2022). The global shortage of semiconductor components as a source of the current crisis in the global automotive industry. *MID (Modernization. Innovations. Development)*, 13(2): 270-287. <https://doi.org/10.18184/2079-4665.2022.13.2.270-287>. (In Russ.)
- Alkaraan F., Albitar K., Hussainey K., Venkatesh V.G. (2022). Corporate transformation toward Industry 4.0 and financial performance: The influence of environmental, social, and governance (ESG). *Technological Forecasting and Social Change*, 175: 121423. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121423>.
- Anackovski F., Kostov M., Pasic R., Kuzmanov I. (2021). The impact of Industry 4.0 on education and future jobs (2021). In: *56th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST)*: 185-188. DOI: 10.1109/ICEST52640.2021.9483516.
- Berg H., Le Blévenec K., Kristoffersen E., Strée B., Witomski A., Stein N., Bastein T., Ramesohl S., Vrancken K. (2020). *Digital circular economy as a cornerstone of a sustainable European industry transformation*. European Circular Economy Research Alliance (ECERA). <https://ss-usa.s3.amazonaws.com/c/308476495/media/19365f987b483ce0e33946231383231/201023%20ECERA%20White%20Paper%20on%20Digital%20circular%20economy.pdf>.
- Berg L.P., Vance J.M. (2017). Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: A survey. *Virtual Reality*, 21(1): 1-17.
- Bughin J., Catlin T., Hirt M., Willmott P. (2018). Why digital strategies fail. *McKinsey Quarterly*, Jan.
- Caccamo C., Pedrazzoli P., Eleftheriadis R., Magnanini M.C. (2022). Using the process digital twin as a tool for companies to evaluate the return on investment of manufacturing automation. *Procedia CIRP*, 107: 724-728. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.052>.
- Carvalho T.P., Soares F.A., Vita R., Francisco R.P., Basto J.P., Alcalá S.G. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137: 106024. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>.
- Deac C.N., Popa C.L., Ghinea M., Cotet C.E. (2017). Using augmented reality in smart manufacturing. In: *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*: 0727-0732. Vienna, DAAAM International. 10.2507/28th.daaam.proceedings.102
- Etz D., Frühwirth T., Kastner W. (2020). Flexible safety systems for smart manufacturing. In: *25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*: 1123-1126. DOI: 10.1109/ETFA46521.2020.9211905.
- Gajdzik B., Wolniak R. (2022). Smart production workers in terms of creativity and innovation: The implication for open innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8(2): 68. <https://doi.org/10.3390/joitmc8020068>.

- Geerts R. (2016). The smart manufacturing elevator pitch, literally! *MESA International's*. <https://blog.mesa.org/2016/03/the-smart-manufacturing-elevator-pitch.html>.
- Grenčíková A., Kordoš M., Berkovič V. (2020). The impact of Industry 4.0 on jobs creation within the small and medium-sized enterprises and family businesses in Slovakia. *Administrative Sciences*, 10(3): 71. <https://doi.org/10.3390/admsci10030071>.
- Guneshka D. (2021). *Benefits of product personalization*. <https://www.iplabs.de/en/blog/blog/benefits-of-product-personalization>.
- Hinz P. (2013). *Effects of mass customization on manufacturing*. <https://www.adaptalift.com.au/blog/2013-06-17-effects-of-mass-customisation-on-manufacturing>.
- Jagannathan S., Ra S., Maclean R. (2019). Dominant recent trends impacting on jobs and labor markets - an overview. *International Journal of Training Research*, 17(sup1): 1-11. DOI: 10.1080/14480220.2019.1641292.
- Kanawaday A., Sane A. (2017). Machine learning for predictive maintenance of industrial machines using iot sensor data. In: *8th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*, IEEE: 87-90. <https://doi.org/10.1109/ICSESS.2017.8342870>.
- Kang H.S. (2016). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology*, 3(1): 111-128.
- Kumar M., Shenbagaraman V.M., Shaw R.N., Ghosh A. (2021). Predictive data analysis for energy management of a smart factory leading to sustainability. In: Favorskaya M.N., Mekhilef S., Pandey R.K., Singh N. (eds.). *Innovations in electrical and electronic engineering. Lecture notes in electrical engineering*, 661. Singapore, Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4692-1_58.
- Lage M.J., Filho M.G. (2010). Variations of the Kanban system: Literature review and classification. *International Journal of Production Economics*, 125(1): 13-21.
- Lu Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6: 1-10.
- Lu Y., Morris K.C., Frechette S. (2016). Current standards landscape for smart manufacturing systems. *National Institute of Standards and Technology*, 8107.
- Mahoney T.C., Kota S. (2020). *Smart manufacturing: Premier for small manufacturers*, March. Report MF-TR-2020-0301. www.MForesight.org.
- Martin N.L., Dér A., Herrmann C., Thiede S. (2020). Assessment of smart manufacturing solutions based on extended value stream mapping. *Procedia CIRP*, 93: 371-376. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.019>.
- Mathai P. (2015). *Big data: Catalyzing performance in manufacturing*. Wipro, Jan., 8. <http://www.wipro.com/documents/Big%20Data.pdf>.
- Matulik P. (2008). *Mass customization*. Zlin, Tomas Bata University. http://195.178.95.140:8080/bitstream/handle/10563/6523/matul%C3%ADk_2008_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Moon S., Becerik-Gerber B., Soibelman L. (2019). Virtual learning for workers in robot deployed construction sites. In: *Advances in informatics and computing in civil and construction engineering*. Proceedings of the 35th CIB W78 2018 Conference: IT in Design, Construction, and Management. Springer, 889-895.
- Negi S., Dhiman S., Sharma R.K. (2013). Basics, applications and future of additive manufacturing technologies: A review. *Journal of Manufacturing Technology Research*, 5(1/2): 75.
- Odważny F., Szymańska O., Cyplik P. (2018). Smart factory: The requirements for implementation of the Industry 4.0 solutions in FMCG environment-case study. *LogForum*, 14(2): 257-267. <http://doi.org/10.17270/J.LOG.2018.253>.
- Paelke V. (2014). Augmented reality in the smart factory: Supporting workers in an Industry 4.0. environment. In: *Proceedings of the 2014 IEEE emerging technology and factory automation (ETFA)*, IEEE, 1-4.
- Phuyal S., Bista D., Bista R. (2020a). Challenges, opportunities and future directions of smart manufacturing: A state of art review. *Sustainable Futures*, 2: 100023. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2020.100023>.
- Phuyal S., Bista D., Izykowski J., Bista R. (2020b). Design and implementation of cost-efficient SCADA system for industrial automation. *International Journal of Engineering and Manufacturing*, 10(2): 15-28. 10.5815/ijem.2020.02.02.
- Piller F.T., Moeslein K., Stotko C.M. (2004). Does mass customization pay? An economic approach to evaluate customer integration. *Production Planning & Control*, 15(4): 435-444. doi:10.1080/0953728042000238773.
- Rahmanzadeh S., Pishvae M.S., Govindan K. (2022). Emergence of open supply chain management: the role of open innovation in the future smart industry using digital twin network. *Annals of Operations Research*, preprint. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04254-2>.
- Ren S., Zhang Y., Liu Y., Sakao T., Huisingh D., Almeida C.M. (2019). A comprehensive review of big data analytics throughout product lifecycle to support sustainable smart manufacturing: A framework, challenges and future research directions. *Journal of Cleaner Production*, 210: 1343-1365.

- Riemer K., Totz C. (2003). The many faces of personalization. In: *The Customer Centric Enterprise*: 35-50. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- Rovito M. (2022). *Smart manufacturing: The future of making is digital*. <https://redshift.autodesk.com/smart-manufacturing/>.
- Schallmo D., Willams C.A., Boardman L. (2018). Digital transformation of business models-best practice, enabler, and roadmap. *International Journal of Innovation Management*, 21(8): 1740014. https://doi.org/10.1142/9781786347602_0005.
- Strozzi F., Colicchia C., Creazza A., Noè C. (2017). Literature review on the 'Smart Factory' concept using bibliometric tools. *International Journal of Production Research*, 55(22): 6572-6591. <http://doi.org/10.1080/00207543.2017.1326643>.
- Ulas D. (2019). Digital transformation process and SMEs. *Procedia Computer Science*, 158: 662-671. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.101>.
- Wang X.V., Wang L. (2020). Safety strategy in the smart manufacturing system: A human robot collaboration case study. In: *Proceedings of the ASME 2020 15th International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 2: Manufacturing Processes; Manufacturing Systems; Nano/Micro/Meso Manufacturing; Quality and Reliability. September 3. V002T07A026. ASME. <https://doi.org/10.1115/MSEC2020-8427>.

Информация об авторе

Сергей Викторович Илькевич

Кандидат экономических наук, доцент департамента менеджмента и инноваций, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Москва, Россия). ORCID: 0000-0002-8187-8290; Scopus ID: 56028209600; SPIN-код: 6655-7300.

Область научных интересов: инновации и бизнес-модели, международный бизнес, цифровая трансформация отраслей, экономика совместного пользования, фондовый рынок, портфельные инвестиции, экономика впечатлений, интернационализация образования.

SVIlkevich@fa.ru

About the author

Sergey V. Ilkevich

Candidate of economic sciences, associate professor, Department of Management and Innovation, Financial University under the Government of the Russian Federation (Moscow, Russia). ORCID: 0000-0002-8187-8290; Scopus ID: 56028209600; SPIN-code: 6655-7300.

Research interests: innovations and business models, international business, digital transformation of industries, sharing economy, stock market, portfolio investment, experience economy, internationalization of education.

SVIlkevich@fa.ru

Статья поступила в редакцию 29.07.2022; после рецензирования 27.08.2022 принята к публикации 2.09.2022. Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The article was submitted on 29.07.2022; revised on 27.08.2022 and accepted for publication on 2.09.2022. The author read and approved the final version of the manuscript.