



Управление инновациями

Научная статья

УДК 330, 338.2, 338.4

DOI: <https://doi.org/10.17308/econ.2022.4/10575>

JEL: B41; L16; L69; O14

«Умная фабрика» и ключевые технологии Индустрии 4.0 (обзор)

К. А. Фонтана¹, Б. А. Ерзнкян²

^{1,2} Центральный экономико-математический институт РАН,
Нахимовский пр., 47, 117418, Москва, Российская Федерация

Предмет. Индустрия 4.0 – это подход к производству, основанный на современных информационных и цифровых технологиях, внедрение которых обеспечивает более высокий уровень производства, способствует эффективному использованию материалов, сокращению монотонной, опасной работы; оказывает влияние на устойчивое развитие. Несмотря на большое количество исследований, связанных с Индустрией 4.0, все еще остается открытым вопрос, касающийся не только самой терминологии, но и технологий, которые характеризуют Индустрию 4.0, и их влияния на современные производственные процессы, что подтверждает актуальность темы исследования.

Цель. Рассмотрение ключевых технологий Индустрии 4.0 в разрезе их влияния на современные производственные процессы, в частности в отношении «Умной фабрики». Понимание степени воздействия технологий Индустрии 4.0 на производственные процессы будет способствовать также стратегическому внедрению подобных технологий для достижения устойчивости.

Метод. Использовались метод анализа отечественной и зарубежной литературы по исследуемому вопросу, в частности сравнительный анализ тематических исследований, практических наработок, а также общенаучные методы познания, методы логического и сравнительного анализа.

Результаты. Обобщены результаты опубликованных исследований, на основе чего авторы подчеркивают важность понимания степени воздействия технологий Индустрии 4.0 (в комплексе) на современные производственные процессы и переход к «Умной фабрике», достижение устойчивости в экономической, социальной и экологической сферах путем повышения эффективности использования ресурсов; рассмотрены ключевые технологии, которые характеризуют Индустрию 4.0 и представляют в совокупности фундаментальную основу «Умной фабрики»; подчеркнуто, что в отношении производственного процесса комплексное внедрение технологий Индустрии 4.0 делает производство умным и адаптивным; киберфизическая система определена как важный элемент «Умной фабрики».

Обсуждение результатов. Подчеркнуто, что комплексное внедрение технологий Индустрии 4.0 является инструментом цифрового и умного производства, предоставляющим производителю ценную информацию о жизненном цикле продукта, помогающим во внедрении новых бизнес-моделей, связывающим различные производственные объекты и события с учетом временного горизонта.

Выводы. Представляется важным изучать не только эффективность внедрения технологий в каждом отдельном случае, но и анализировать степень воздействия технологий Индустрии 4.0 на производственные процессы в целом; подчеркнуто, что взаимодействие технологий Индустрии 4.0 способствует созданию и развитию новой производственной экосистемы – «Умной фабрики»; обоснована необходимость выявления потенциальных барьеров, ограничивающих возможности интеграции технологий Индустрии 4.0 в рассматриваемых процессах (в частности, переход к «Умной фабрике» представляется невозможным, если предприятия не прошли этап цифровизации – важно создавать условия для перевода предприятий на современный уровень цифрового производства).

Ключевые слова: устойчивое развитие, производственные процессы, стратегическое внедрение, ключевые технологии, киберфизическая система.

Для цитирования: Фонтана К. А., Ерзнкян Б. А. «Умная фабрика» и ключевые технологии Индустрии 4.0 (обзор) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2022. № 4. С. 53–67. DOI: <https://doi.org/10.17308/econ.2022.4/10575>

Введение

Понятие Четвертой Промышленной Революции (Индустрия 4.0) появилось на стыке развития и внедрения интеллектуальных, информационных и цифровых технологий, что позволило обеспечить более высокий уровень производства, а также оказало влияние на социальное и экологическое устойчивое развитие. Так, согласно Sharma et al. [27], потенциал Индустрии 4.0 (I4.0) направлен на достижение устойчивости в экономических, социальных и экологических сферах путем повышения эффективности использования ресурсов. Иными словами, I4.0 представляет собой современную производственную систему, основанную на новейших информационных и цифровых технологиях, что способствует достижению устойчивости.

Несмотря на большое количество исследований, связанных с I4.0, все еще остается расплывчатость в терминологии – I4.0 скорее остается собирательным термином различных технологических разработок. Одна из причин такого положения может быть связана с политически мотивированным (а не чисто научным) происхождением самой концепции, так как она сочетает в себе политические амбиции наравне с технологическими разработками. Поэтому, получив широкое международное признание, данная концепция все еще подвергается критике из-за отсутствия научного определения, отмечают Oesterreich & Teuteberg [20].

В 2011 г. в Германии немецкими исследователями Kagermann et al. [12] было введено понятие *Industrie 4.0*, для определения будущего немецкой экономики «с высоким уровнем автоматизации, операционной производительности и эффективности за счет подключения физического мира к виртуальному». В понимании немецких ученых I4.0 характеризовалась не только как технологическое развитие промышленности страны, но имела политическую коннотацию для поддержки «позиции Германии как лидера в отрасли промышленного машиностроения»¹.

¹ Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0 // Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft; Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. 2015. URL: <https://clck.ru/32kgGq> (In German)

Согласно Motyl et al. [19], I4.0 можно определить как производство киберфизических систем, основанное на гетерогенной интеграции данных и знаний, которое можно обозначить как производственный, интегрированный, адаптированный сервис-ориентированный процесс, коррелирующий с такими технологиями I4.0, как Интернет Вещей, Промышленный Интернет Вещей и Интернет Услуг, Облачные Вычисления, Аналитика Больших Данных, Аддитивное производство, Дополненная Реальность, Робототехника, Кибербезопасность и т. п. Таким образом, в отношении производственного процесса I4.0 делает производство умным и адаптивным, используя системную интеграцию для поиска и принятия эффективных, инновационных решений.

Следует отметить, что человеческий вклад (качество которого должно улучшаться за счет развития профессиональных навыков участников процесса и заинтересованных сторон) является ключевым элементом подобной интеграции.

Понимание степени воздействия технологий I4.0 на современные производственные процессы будет способствовать стратегическому внедрению технологий I4.0 для достижения устойчивости, а прорывные технологии I4.0 могут помочь ученым и практикам преодолеть существующие технологические барьеры и достичь не только высокого уровня производства, но и социального и экологического устойчивого развития.

Цель исследования заключается в рассмотрении ключевых технологий I4.0 в разрезе их влияния на современные производственные процессы, в том числе в отношении «Умной фабрики» (УФ) (*Smart factory*)².

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: рассматриваются технологии Индустрии 4.0, в том числе с позиции ключевых технологий, способствующих переходу к «Умной фабрике»; освещается их влияние на производственные процессы; выявляются потенциальные проблемы (барьеры) интеграции подобных технологий в УФ; приводятся практические примеры внедрения по-

² «Умная фабрика» – производственная система, которая использует технологии I4.0, киберфизическую производственную систему и системную интеграцию.

добных технологий (*первая часть*); исследуется вклад «умных элементов» киберфизической производственной системы в современные процессы разработки / корректировки производственных стратегий для достижения поставленных задач и перехода к УФ, где проектирование продукта, его производство, сбыт, утилизация в конце срока службы, логистические цепочки должны воспроизводить единый сценарий системной интеграции в соответствии с информационным потоком и учетом различных уровней автоматизации и цифровизации (*вторая часть*). Заключительная часть содержит основные выводы по результатам проведенного исследования.

Материалы и методы исследования

В качестве методологического аппарата использованы метод анализа (систематического обзора) отечественной и зарубежной литературы по исследуемому вопросу, в частности сравнительный анализ тематических исследований, практических наработок, а также общенаучные методы познания, методы логического и сравнительного анализа.

Используемые методы позволили авторам исследовать текущее состояние конкретной области знаний, выявить пробелы в исследованиях, проанализировать и обобщить данные по изучаемому вопросу путем синтеза результатов исследований, в том числе оценить потенциал технологий I4.0 для перехода к УФ.

Контент-анализ исследований по теме «Индустрия 4.0» показал определенные сходства у авторов в понимании того, какие современные технологии относятся к технологиям I4.0, степени их влияния на процессы перехода производственных предприятий к УФ и устойчивому развитию, что не отменяет существование иных взглядов и подходов по данному вопросу.

Сделанные выводы могут содействовать будущим исследованиям и продвижению знаний в отношении УФ, важности стратегического внедрения технологий I4.0 для достижения устойчивого развития.

Основные технологии Индустрии 4.0

Интернет Вещей (IoT)

и Промышленный Интернет Вещей (IIoT)

Концепция IoT, в которой все связано, не нова; были предприняты многочисленные усилия, чтобы воплотить ее в жизнь. Никола

Тесла еще в 1926 г. в интервью *Collier's magazine* сказал: «Когда беспроводная связь будет правильно реализована, весь мир превратится в массивный мозг... и инструменты, с помощью которых мы сможем это сделать, будут невероятно простыми по сравнению с нашими нынешними телефонами»³.

Sezer et al. [26] дают следующее описание IoT: IoT позволяет людям и вещам быть связанными в любое время, в любом месте, с чем угодно и с кем угодно, используя в идеале любой путь и/или сеть.

IIoT можно охарактеризовать как применение подходов IoT в промышленном контексте для поддержки цифровой трансформации отраслей промышленности. В ноябре 2012 г. Evans & Annunziata [8] из General Electric опубликовали исследование, в котором определили IIoT как объединение достижений в области вычислений, подключения и аналитики с промышленными системами.

Российские ученые Радов и др. [1], говоря о IIoT, представляют его как комплекс методов обработки Больших Данных (БД), позволяющий проводить анализ и расчеты, связанные с производственными процессами, в автоматическом режиме. По их мнению, IIoT – это важная комплексная информационная структура, которая позволяет поддерживать интеллектуальное производство.

Обобщив, можно утверждать, что IIoT сочетает в себе производственные технологии с БД, интеллектуальными цифровыми технологиями и машинным обучением для создания новой промышленной экосистемы.

Интернет Услуг (IoS)

IoS рассматривают как взаимодействие вещей, создающих ценные услуги с помощью интернета.

В контексте промышленности, ориентированной на создание продукта, включение IoS приводит к смещению в сторону сервис-ориентированного производства, что, в свою очередь, способствует не только повышению качества продукции, но и позволяет получать доход на протяжении всего жизненного цикла продукта (формируется «система обслуживания продукции»). В частности, Andulkar et al. [4] рассматривают IoS как технологию мониторинга жизненного цикла продукта.

³ URL: <https://clck.ru/32kgL2>

В данном контексте IoS является одной из фундаментальных основ УФ.

Облачные Вычисления (ОВ)

ОВ можно рассматривать в качестве альтернативной технологии для тех компаний, которые инвестируют в ИТ-аутсорсинг. Важным преимуществом ОВ является то, что их внедрение позволяет сократить как косвенные, так и прямые затраты на ИТ-инфраструктуру организации.

Команда *Yandex Cloud* определяет ОВ следующим образом: это технология, которая обеспечивает доступ к компьютерным ресурсам через интернет; нет необходимости покупать, хранить и обслуживать физическое оборудование (эти функции берет на себя облачный провайдер); пользователь получает доступ к терминалу управления (в котором настраиваются характеристики виртуальных серверов / подключаются дополнительные сервисы); пользователь оплачивает услуги по факту потребления, а объем ресурсов практически неограничен (что дает возможность нарастить мощности по мере необходимости / отключить все лишнее).

Для прямого взаимодействия на уровне пользовательского интерфейса используются так называемые базовые слои «*everything as a service*».

1. «*Инфраструктура как услуга*» – место, где поставщик облачных услуг предоставляет пользователям облака вычислительные услуги и/или виртуальную инфраструктуру, чтобы последний мог запускать готовое программное обеспечение.

2. «*Платформа как услуга*» – место, где пользователи облака могут разрабатывать / запускать свои приложения, разработанные на основе языков программирования с использованием удаленных ИТ-платформ.

3. «*Программное обеспечение как услуга*» – место, где приложения не только размещаются, но и работают в облачной инфраструктуре, а пользователи облака имеют к ним доступ через свои устройства (интерфейс). В данном случае Ooi et al. [21] отмечают, что речь идет об использовании приложений с более низкой совокупной стоимостью владения, т. е. использовании технологического решения в течение определенного периода его жизненного цикла.

Однако, если речь идет о производственной среде, то здесь используется концепция, называемая *Cloud Manufacturing (СМ)*, направлен-

ная на улучшение производственных систем с использованием технологий ОВ. Одной из основных характеристик СМ является смещение с производственно-ориентированного подхода на сервис-ориентированный. Таким образом, СМ оказывает пользователям услуги на всех этапах жизненного цикла продукта; предоставляет в виде сервиса масштабируемые, экономически выгодные, гибкие решения (подробнее см., например: Feng & Huang [9]).

Как и IoS, функционирование УФ подразумевает внедрение СМ.

Большие Данные (БД). Аналитика БД

Согласно Радову и др. [1], БД состоят преимущественно из технологий сбора, хранения и управления данными; технологий предварительной обработки данных; технологий анализа и визуализации.

Семернек et al. [6] под БД понимают «большие объемы высокоскоростных, сложных и переменных данных, требующих современных методов сбора, хранения, распространения, управления и анализа информации».

Действительно, ценность и значимость данных проявляется после соответствующей их обработки и анализа. Поэтому Аналитика БД является важным инструментом цифрового производства, предоставляя производителю ценную, актуальную информацию о жизненном цикле продукта, помогая в принятии решений и пр.

Sen et al. [25] подчеркивают, что IoT являются частью БД, а ОВ, в свою очередь, обеспечивают ИТ-инфраструктуру.

Аддитивное Производство (АП)

АП – это технология создания трехмерных объектов, деталей, вещей путем послойного добавления материала. Таким образом, АП помогает в производстве новых продуктов, внедрении новых бизнес-моделей, а также позволяет включить высокоэффективные приложения в современные производственные процессы. В частности, с помощью АП можно создавать прототипы продуктов / деталей, экономя время на проектировании, формировании логистических цепочек, налаживании нового производственного процесса. С АП процесс изготовления продукта контролируется программным обеспечением, что делает его высокоцифровым процессом.

Примером АП является 3D-печать, которая стала собирательным термином АП. Следующим поколением процессов АП, по всей видимости, будут микро- и нано-3D-печать, биопечать, 4D-печать (сочетание интеллектуальных материалов, способных менять (адаптироваться) свою форму и свойства), отмечают Chang et al. [7].

АП, являясь важным методом цифрового производства, представляет собой одну из ключевых технологий, способствующих переходу к УФ. Вместе с тем интеграция АП в УФ сопряжена с рядом проблем. Помимо отсутствия возможности подключения и отслеживания компании сталкиваются с трудностями, когда речь идет о создании автоматизированного и безопасного рабочего процесса АП, основанного на принципах устойчивости.

Ниже приводятся основные требования, необходимые для интеграции АП в умное производство⁴.

1. Связь и управление данными.

В АП данные непрерывно генерируются на каждом этапе производства. Чтобы никакая часть оборудования / бит данных не остались изолированными, используют ИИТ, которая позволяет расширить возможности подключения и сбора данных за счет использования датчиков, передатчиков, программного обеспечения и сетей. Кроме того, ИИТ предлагает возможность устранения разрозненности между операционными технологиями (машинами АП) и информационными технологиями (программное обеспечение и сети), чтобы обеспечить непрерывную передачу данных в режиме реального времени.

2. Автоматизация.

Ключом к внедрению АП на УФ является комплексная автоматизация, которая способна заменить монотонный человеческий труд. Автоматизация, достигаемая за счет сочетания аппаратного и программного обеспечения, роботов, датчиков, обеспечивает рациональные процессы в рамках сквозного цифрового производственного цикла. Что касается АП, то его автоматизация охватывает все уровни производственного процесса (от проектирования до производства и отгрузки продукта).

3. Контроль.

На производстве контроль означает возможность отслеживать каждую деталь / продукт на протяжении всего производственного процесса, с момента поступления сырья на завод до момента отгрузки готовой продукции, что гарантирует помимо прочего качество процессов АП (поскольку предприятие, получая ключевые данные, может оптимизировать процессы при возникновении ошибок / сбоев). В настоящее время подобный контроль является одной из ключевых проблем, с которыми сталкиваются предприятия, интегрирующие АП в свое производство. Другой проблемой является возможность отслеживания повторного использования материала. Одним из решений подобных проблем является разработка специализированного программного обеспечения, а также использование преимуществ Аналитики БД.

4. Устойчивость.

На УФ традиционная линейная производственная модель «бери – производи – утилизируй» не работает. Умное производство означает устойчивое производство, при котором используются принципы экономики замкнутого цикла (К. А. Фонтана, Б. А. Ерзнкян [2]). АП часто рассматривается как устойчивая технология благодаря своей способности производить более эффективные конструкции, требующие меньшего количества материалов для производства.

5. Кибербезопасность.

На традиционном производстве кража одного предмета, скорее всего, не приведет к значительной потере дохода, но с использованием АП последствия могут быть гораздо более серьезными (например, несанкционированный доступ к данным может иметь серьезные последствия для бизнеса). Поэтому опасения по поводу безопасности технологий И4.0, в частности АП, вполне обоснованы. Как следствие, обеспечение кибербезопасности УФ становится критически важной темой (см. о кибербезопасности далее).

Дополненная Реальность (ДР)

ДР можно определить как совокупность технологий, которые в реальном времени дополняют физический мир (то, как мы его видим) цифровыми данными с помощью современных технологий и программ (используются элек-

⁴ С использованием данных из открытого доступа компании *Additive Manufacturing Execution System & Workflow Automation Software (AMFG)*, которая предоставляет услуги по разработке программного обеспечения и внедрения технологий АП на производстве. URL: <https://clck.ru/32kgPE>

тронные устройства для просмотра реальной комбинации совместно с виртуальными элементами).

Целью ДР является повышение производительности человека за счет предоставления ему необходимой информации для решения конкретных задач. Использование ДР в производственных процессах, в частности на УФ, представляет собой эффективную технологию для решения производственных задач и при принятии управленческих решений. Например, ДР может быть использована для устранения пробелов, которые могут возникнуть на этапах разработки / при запуске производства нового продукта, благодаря своей способности одновременно воспроизводить и многократно использовать цифровую информацию на каждом этапе производственного процесса. Другими перспективными направлениями ДР на производстве являются техническое обслуживание, отправка инструкций по ремонту через мобильные приложения; также ДР могут использоваться при виртуальном обучении сотрудников и пр.

Роботы

Pedersen et al. [22] отмечают, что современная производственная парадигма смещает производство от массового к индивидуальному, что ведет к адаптации производства к более широкому разнообразию продуктов. Чтобы достичь требуемого уровня гибкости, необходимо широкое внедрение в производственные процессы роботов с искусственным интеллектом, адаптивных и гибких, которые смогут облегчить и ускорить производство разнообразных продуктов, обеспечив при этом снижение производственных затрат. Кроме того, автономные промышленные роботы могут замещать человека на опасных и монотонных производствах.

Koch et al. [16] свидетельствуют, что в последнее время получила развитие концепция коллаборативных роботов (коботов) – категории роботов, разработанной для непосредственного физического взаимодействия с человеком на производстве. Коботы (как и промышленные роботы) состоят из «манипулятора и перепрограммируемого устройства управления, которое формирует управляющие воздействия, задающие требуемые движения исполнительных органов манипулятора».

В рамках развития и более широкого внедрения УФ сотрудничество людей и коботов, по всей видимости, будет расширяться, постепенно разрушая барьер между человеком и роботом в производственных процессах, предлагая большую доступность и гибкость решений.

Кибербезопасность (КБ)

КБ – это технологии, предоставляющие информационную безопасность, основной целью которых является обнаружение, реагирование и защита от внешних и внутренних кибератак, в том числе в промышленной среде, как отмечают Kannus & Ilvonen [13]. Виртуальная среда, IoT, данные в облачных хранилищах и пр. являются основными объектами уязвимости.

Кибератаки могут представлять серьезную угрозу в том числе для промышленных систем управления (СУ)⁵. Так, воздействие на физические промышленные объекты (в отличие от хакерских атак, направленных исключительно на информационные системы) может привести к серьезным авариям (в частности, на химических производствах), остановкам / задержкам производственного процесса, что в свою очередь ведет к финансовым издержкам, потере доверия клиентов и прочим рискам.

Уязвимость промышленных СУ может быть связана с использованием открытых архитектур, которые часто имеют подключение к внешним системам; при этом большинство коммуникационных протоколов для промышленных СУ разработаны без учета КБ. Поэтому представляется чрезвычайно важным, чтобы КБ была внедрена в обязательном порядке на всех промышленных СУ (в том числе УФ) и функционировала в автоматическом режиме реагирования на инциденты, предусматривала функцию постоянного обновления средств контроля безопасности, поддерживая их в актуальном состоянии.

Моделирование

Alcácer & Cruz-Machado [3] отмечают, что успешное внедрение цифрового производства, организация и функционирование УФ невозможны без компьютерного моделирования, которое позволяет помимо прочего проводить

⁵ Согласно Knapp & Langill [15], промышленные системы управления представляют собой «широкий класс систем автоматизации, используемых для обеспечения функциональности управления и мониторинга на производственных и промышленных объектах».

эксперименты для валидации результатов проектирования и конфигурирования продуктов / процессов, в том числе в режиме реального времени.

Современный инструмент моделирования обладает высоким потенциалом для оптимизации принятия решений в режиме реального времени (в отличие от моделирования процессов, например для анализа сценариев «что, если»). То есть речь идет о моделировании в режиме онлайн, которое связывает различные производственные объекты, события, генерируемые производственной системой, с учетом временного горизонта. Данная опция является чрезвычайно важной во время операционного процесса производственной системы, например при планировании производственных процессов, контроле процесса технического обслуживания в режиме реального времени.

По мнению Pushpa & Kalyani [23], важным направлением моделирования в рамках I4.0 является технология «Цифрового Двойника» (ЦД) – «виртуальная или оцифрованная модель услуги, продукта или процесса или любого IoT». Иными словами, ЦД представляет собой программный аналог физического объекта (продукта), моделирующий внутренние процессы, технические характеристики, а также поведение реального объекта (продукта) в условиях воздействия заданных внешних помех, в том числе климатических; входные данные воздействия могут браться с датчиков реального устройства; возможно дальнейшее сравнение информации с виртуальных датчиков ЦД с датчиками реального устройства для выявления, например, аномалий и причин их возникновения. Соответственно, ЦД помогает менять параметры работы оборудования / характеристик продукта, вносить улучшения быстрее и безопаснее, чем при экспериментах на реальных объектах⁶.

Так, с учетом промышленного контекста для любого продукта может быть разработано несколько ЦД, что позволяет достаточно точно предсказать его состояние в различных условиях и на различных этапах эксплуатации. Таким образом, ЦД помогают предприятиям отслеживать прошлые, текущие и будущие показатели на протяжении всего жизненного цикла того или иного физического актива.

⁶ С использованием данных электронной версии TADVISER.

ЦД включает в себя три компонента: физические объекты, виртуальные модели, данные, которые соединяют физические и виртуальные модели. Конвергенция БД и ЦД разрушает барьеры между фазами жизненного цикла продукта, сводя к минимуму цикл проектирования и тестирования нового продукта. Кроме того, ЦД позволяет существенно расширить возможности ОБ и ИИТ.

Таким образом, большинство исследователей сходятся во мнении, что ЦД представляют собой неотъемлемый элемент УФ.

Россия – первая в мире страна, которая утвердила стандарты в области ЦД. Соответствующий документ – «Численное моделирование» (ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения») – одобрен Росстандартом и введен в действие 1 января 2022 г. Национальный стандарт в области ЦД распространяется на изделия машиностроения. Авторы документа отмечают, что на его основе в дальнейшем могут быть разработаны стандарты, устанавливающие требования к ЦД для различных отраслей промышленности. В данном документе впервые в мировой практике устанавливается единое определение «цифрового двойника изделия»: это система, состоящая из «цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями»; кроме того, стандартизованы такие понятия, как «цифровые (виртуальные) испытания», «цифровой (виртуальный) испытательный стенд», «цифровой (виртуальный) испытательный полигон».

В другом документе – серии стандартов ПНСТ «Умное производство. Двойники цифровые производства»⁷ – определена структура цифровых двойников производства как «виртуального представления физических элементов производственного процесса, таких как персонал, продукты производства, активы и описание процессов». Согласно утвержденному документу, ЦД производства представляет собой «детальное моделирование конфигураций физических сущностей и динамическое моделирование изменений продукта, процесса и ресурсов в процессе производства».

⁷ Предварительный Национальный Стандарт Российской Федерации (ПНСТ) 429-2020 «Умное производство. Двойники Цифровые Производства»; ОКС 25.040.01, срок действия с 2021-01-01 до 2024-01-01.

Киберфизическая Система (КФС)

Tura et al. [29] утверждают, что КФС является ключевой технологией УФ и определяется как слияние «кибер» (электрических и электронных систем) с «физическими» объектами. Иными словами, в КФС киберкомпонент позволяет физическому компоненту (например, механическим системам) взаимодействовать с физическим миром, создавая посредством оцифровки данных его виртуальную копию, которая включает «физическую составляющую» – кибер-представление.

Согласно Vocciarelli et al. [5], модель КФС можно описать как блок управления с одним или несколькими микроконтроллерами, управляющими датчиками и исполнительными механизмами, который взаимодействует с реальным миром и обрабатывает собранные данные; коммуникационный интерфейс позволяет встроенной системе обмениваться данными с облаком или другими встроенными системами (см., например: Humayed et al. [10]). Как утверждают Trappey et al. [28], КФС представляет собой «совокупность трансформационных технологий, способствующих управлению взаимосвязанными вычислительными и физическими процессами».

Например, «умные элементы» КФС, обладая расширенным интеллектом и способностью общаться друг с другом, могут участвовать в планировании, выбирать / самостоятельно находить новые стратегии, корректировать производственные стратегии для достижения поставленных задач.

На бытовом уровне КФС уже начали менять нашу жизнь благодаря появлению роботизированной хирургии, умным зданиям, автономным автомобилям и пр.

Rojas et al. [24] рассматривают КФС в качестве «строительных блоков»⁸ УФ, которые, будучи связанными между собой через цифровые сети, образуют киберфизическую производственную систему (КФПС)⁹, что по-

⁸ Представление на основе «строительных блоков» (Building-Blocks) опирается на абстрактное определение строительного блока, которое используется для представления многих технологических явлений, задач и оборудования для разработки интенсификационных / традиционных вариантов процесса. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/building-blocks> (дата обращения: 28.08.2022).

⁹ В своих работах ряд авторов, например Khalid et al. [13], Liu & Xu [15], Wang et al. [28], исследуют уровни сотрудничества и коммуникации КФПС в производственных процессах в рамках УФ.

зволяет УФ функционировать одновременно в физическом, цифровом и киберпространствах, а также предлагать сценарии промышленного производства в режиме реального времени.

Результаты: «Умная фабрика»

В современном мире возможности умного и классического производства соединятся. Эволюция технологий в рамках I4.0 коренным образом изменила способ работы производственных предприятий, которые становятся более взаимосвязанными, инновационными, прокладывая тем самым путь к УФ. Однако важно отметить, что все еще существует множество предприятий, которые не только далеки от того, чтобы быть «умными» (или развиваться в направлении УФ), но далеки и от того, чтобы быть цифровыми. Поэтому важно не только создавать условия для УФ, но и перевести существующие предприятия на современный уровень цифрового производства («Цифровая Фабрика»)¹⁰.

В РФ тестирование технологий для создания УФ планируется проводить на базе испытательных полигонов. Первый этап реализации «дорожной карты» в данном направлении предполагает создание трех структур: испытательного полигона для генерации «цифровых», «умных» и «виртуальных» фабрик на базе Института передовых производственных технологий СПбПУ; испытательного полигона на базе НПО «Сатурн»; экспериментально-цифровых центров сертификации на базе Сколковского института науки и технологий и МГУ им. М. В. Ломоносова¹¹.

Что касается научных исследований, то зачастую в них акцент делается на процессе внедрения тех или иных технологий I4.0 на определенных предприятиях (в отраслях), анализе их (положительного) влияния на производственную деятельность и принятие управленческих решений, без уделения должного внимания вопросу комплексного внедрения технологий I4.0 для перехода предприятий на современный уровень цифрового производства и далее к УФ, что отвечало бы

¹⁰ «Цифровая Фабрика» – это производство, построенное на основе «цифрового моделирования и проектирования кастомизированной продукции от стадии первичного исследования до создания "умного цифрового двойника" изделия, физического опытного образца или небольшой партии» (в данном исследовании этот вопрос не рассматривается).

¹¹ См. подробнее: URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3814100> (дата обращения: 29.08.2022).

также целям устойчивого развития. Так, на УФ проектирование продукта, его производство, сбыт, утилизация в конце срока службы (или, в зависимости от типа продукта, – переработка и восстановление (в рамках внедрения принципов экономики замкнутого цикла)), логистические цепочки – взаимосвязаны и воспроизводят единый сценарий системной интеграции в соответствии с информационным потоком и учетом различных уровней автоматизации и цифровизации. В исследовании Jian [11] указывается, что опираясь на КФПС с использованием ключевых технологий I4.0, УФ, будучи производственной системой, обеспечивает сквозную системную интеграцию по всей цепочке создания стоимости, учитывая весь жизненный цикл продукта. Поэтому представляется важным рассматривать не только целесообразность и эффективность внедрения тех или иных цифровых технологий в каждом конкретном случае (на предприятии или в отрасли), но и анализировать степень воздействия технологий I4.0 (которые делают производство умным и адаптивным) на производственные процессы в целом, что помимо прочего будет способствовать стратегическому внедрению подобных технологий в рамках формирования УФ.

Обсуждение результатов

Использование технологий I4.0 позволяет обеспечить более высокий уровень производства, оказывает влияние на социальное и устойчивое развитие. В последнее время исследователи уделяют все больше внимания изучению вопросов, связанных с I4.0. Однако остается пробел в области комплексного рассмотрения влияния подобных технологий на производственные процессы и перехода к УФ. Вместе с тем понимание степени воздействия технологий I4.0 на современные производственные процессы будет способствовать стратегическому внедрению технологий I4.0, достижению экономической эффективности предприятий, экологической и социальной устойчивости.

Использованный в работе метод обзора научной литературы по исследуемому вопросу, в частности сравнительный анализ тематических исследований, практических наработок, позволил обобщить результаты опубликованных исследований; определить I4.0 как производство КФС (см.: Motyl et al. [19]), а вклад

«умных элементов» КФПС в современные процессы разработки производственных стратегий признать важным элементом перехода к УФ, где проектирование продукта, его производство, сбыт, утилизация в конце срока службы, логистические цепочки позволяют воспроизводить единый сценарий системной интеграции в соответствии с информационным потоком и учетом различных уровней автоматизации и цифровизации.

Авторами рассмотрены ключевые технологии, которые характеризуют I4.0 и представляют в своей совокупности фундаментальную основу УФ; проанализировано их влияние в отношении УФ, при этом подчеркивается, что в отношении производственного процесса комплексное внедрение технологий I4.0 с использованием системной интеграции для поиска и принятия эффективных, инновационных решений делает производство умным и адаптивным.

В исследовании рассмотрены и даны характеристики следующим ключевым технологиям I4.0: *Интернет Вещей, Промышленный Интернет Вещей, Интернет Услуг, Облачные Вычисления* (в частности, если речь идет о производственной системе, то используются *Cloud Manufacturing*), *Большие Данные и Аналитика Больших Данных, Аддитивное Производство, Дополненная Реальность, Роботы* (в частности, *Коботы*), *Кибербезопасность, Моделирование* (в частности, *Цифровые Двойники*) (см., например: К. С. Радов и др. [1], Feng & Huang [9], Kannus & Ilvonen [13], Koch et al. [16], Ooi et al. [21], Pishpa & Kalyani [23], Sen et al. [25]).

В качестве ключевого элемента УФ выделена киберфизическая система, в которой киберкомпонент позволяет физическому компоненту взаимодействовать с физическим миром, создавая его виртуальную копию (кибер-представление) (см., например: Humayed et al. [10], Trappey et al. [28]). Следует отметить позицию Rojas et al. [24], которые говорят о КФПС, построение и реализация которой позволяет УФ функционировать одновременно в физическом, цифровом и киберпространствах (см., например: Khalid et al. [14], Liu & Xu [17], Wang et al. [30]).

Важным представляется то, что технологии изучались не изолированно друг от друга, а как совокупность технологий I4.0 (которые дополняют и расширяют возможности друг друга), представляя собой важный инстру-

мент цифрового и умного производства, моделирования в режиме онлайн, что позволяет достигать поставленных задач, связанных с современными производственными процессами, создавать новые промышленные экосистемы (УФ), предоставляя производителю ценную информацию о жизненном цикле продукта, помогая в принятии решений, внедрении новых бизнес-моделей и высокоэффективных приложений в современные производственные процессы, связывая различные производственные объекты и события, генерируемые производственной системой, с учетом временного горизонта, позволяя предсказывать состояние объекта / продукта в различных условиях, на различных этапах эксплуатации.

Понятие I4.0, характеризующее современную производственную систему, основанную на современных информационных и цифровых технологиях, фактически появилось на стыке развития и внедрения интеллектуальных, информационных и цифровых технологий и, несмотря на растущее количество исследований, связанных с I4.0 и технологиями I4.0, остается собирательным термином и все еще подвергается критике из-за отсутствия научного определения и четких рамок относительно самой концепции. Представленное в данной работе понимание УФ, важности стратегического комплексного внедрения технологий I4.0, роли (степени влияния) технологий I4.0, способствующих переходу к УФ, а также выделение ключевых технологий I4.0 являются возможными путями исследования в данной области, что не отменяет существования иных позиций и подходов по данному вопросу.

Заключение

Основой Индустрии 4.0 являются передовые информационно-коммуникационные технологии, в частности цифровые, внедрение которых обеспечивает более высокий уровень производства; способствует эффективному использованию материалов, а также устранению (сокращению) монотонной работы и физически сложных / опасных работ на производстве за счет исключения присутствия человека из подобных процессов; оказывает влияние на социальное и экологическое устойчивое развитие.

В представленном исследовании авторы не делали акцента на изучении процесса внедрения конкретных технологий Индустрии 4.0 на определенных предприятиях (отраслях)

и анализе их влияния на производственную деятельность. Использование метода сравнительного анализа тематических исследований и практических наработок позволило обобщить результаты опубликованных исследований, в связи с чем авторы исходили из посыла важности понимания степени воздействия технологий Индустрии 4.0 (в комплексе) на современные производственные процессы, перехода к «Умной фабрике», а также достижения устойчивости в экономической, социальной и экологической сферах путем повышения эффективности использования ресурсов.

В исследовании подчеркивается, что на «Умной фабрике» проектирование продукта, его производство, логистические цепочки, сбыт и (далее в рамках экономики замкнутого цикла) утилизация в конце срока службы / переработка / восстановление взаимосвязаны и воспроизводят единый сценарий системной интеграции в соответствии с информационным потоком и учетом различных уровней автоматизации и цифровизации. Опираясь на киберфизические производственные системы и используя ключевые технологии Индустрии 4.0, «Умная фабрика», будучи производственной системой, обеспечивает сквозную системную интеграцию по всей цепочке создания стоимости, учитывая весь жизненный цикл продукта, что способствует достижению целей устойчивого развития.

В работе рассмотрены ключевые технологии Индустрии 4.0 в разрезе их влияния на современные производственные процессы, в том числе в отношении «Умной фабрики»; показано, что их взаимодействие способствует созданию и развитию новой производственной экосистемы («Умной фабрики»); обозначен ряд потенциальных проблем (барьеров) интеграции подобных технологий (в частности, Аддитивного Производства) в «Умной фабрике»; показана ключевая роль киберфизических систем (которая определяется как слияние «кибер» (электрических и электронных систем) с «физическими» объектами) в «Умной фабрике», что позволяет воспроизводить единый сценарий системной интеграции в соответствии с информационным потоком и учетом различных уровней автоматизации и цифровизации; отмечается необходимость повышения уровня кибербезопасности при внедрении технологий Индустрии 4.0, а также подчеркнута важность защиты промышлен-

ных систем управления, чтобы минимизировать риски от последствий кибератак.

Делается вывод, что внедрение инновационных цифровых технологий меняет способ работы производственных предприятий, которые становятся более взаимосвязанными, инновационными, умными. Вместе с тем одним из ограничений подобного процесса является то, что все еще остается значительное количество предприятий, которые еще не прошли этап цифровизации (не могут считаться «Цифровой фабрикой»), без которого переход к «Умной фабрике» невозможен. Поэтому важно не только создавать условия для перехода к «Умной фабрике», но и перевести существующие предприятия на современный уровень цифрового производства.

Сделанные в работе выводы могут содействовать будущим исследованиям и продвижению знаний в отношении «Умной фабрики», стратегического комплексного внедрения технологий Индустрии 4.0 для достижения

устойчивого развития. Результаты исследования могут найти отклик в научной среде, а также у заинтересованных сторон, связанных с промышленным производством, у предпринимателей малых и средних предприятий, рассматривающих возможности развития в направлении «Умной фабрики».

Благодарности

Доклад на данную тему был представлен на 45-м заседании Международной научной школы-семинара «Системное моделирование социально-экономических процессов» имени академика С. С. Шаталина (3–9 октября 2022 г.). Авторы благодарят организационный комитет школы-семинара за обсуждение настоящей работы и рекомендацию к публикации.

Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Библиографический список

1. Радов К. С., Тугарин С. В., Коровина А. А., Кузнецов М. О. Интеграционный характер функционирования инновационных технологий в области информатизации и глобальной экономики // Московский экономический журнал. 2021. № 9. С. 617–623. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10564
2. Фонтана К. А., Ерзнкян Б. А. Потенциал циркулярной экономики и «природных решений» – возможность достижения устойчивого развития // Экономический анализ : теория и практика. 2022. Т. 21 (4). 616–642. DOI: 10.24891/ea.21.4.616
3. Alcácer V., Cruz-Machado V. Scanning the Industry 4.0 : A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2019. № 3 (22). С. 899–919. DOI: 10.1016/j.jestch.2019.01.006
4. Andulkar M., Le D. T., Berger U. A multi-case study on Industry 4.0 for SME's in Brandenburg, Germany // Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences. 2018. DOI: 10.24251/HICSS.2018.574
5. Bocciarelli P., D'Ambrogio A., Giglio A., Paglia E. A BPMN extension for modeling Cyber-Physical-Production-Systems in the context of Industry 4.0 // 2017 IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), May 2017, Calabria. 2017. P. 599–604. DOI: 10.1109/ICNSC.2017.8000159
6. Cemernek D., Gursch H., Kern R. Big Data as a promoter of industry 4.0 : Lessons of the semiconductor industry // 2017 IEEE 15th International Conference on

Industrial Informatics (INDIN), Emden, Germany, 24–26 July 2017. 2017. P. 239–244. DOI: 10.1109/INDIN.2017.8104778

7. Chang J., He J., Mao M., Zhou W., Lei Q., Li X., Li D., Chua C.-K., Zhao X. Advanced Material Strategies for Next-Generation Additive Manufacturing // Materials. 2018. Vol. 11 (1). P. 166. DOI: 10.3390/ma11010166

8. Evans P.C., Annunziata M. Industrial Internet : Pushing the boundaries of minds and machines // General Electric. 2012.

9. Feng Y., Huang B. A hierarchical and configurable reputation evaluation model for cloud manufacturing services based on collaborative filtering // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 94. P. 3327–3343. DOI: 10.1007/s00170-017-0662-x

10. Jian J. R. An improved cyber-physical systems architecture for Industry 4.0 smart factories // 2017 International Conference on Applied System Innovation (ICASI), 13–17 May 2017, Sapporo, Japan. 2017. P. 918–920. DOI: 10.1109/ICASI.2017.7988589

11. Humayed A., Lin J., Li F., Luo B. Cyber-Physical Systems Security – A Survey // IEEE Internet of Things Journal. 2017. Vol. 4 (6). P. 1802–1831. DOI: 10.1109/JIOT.2017.2703172

12. Kagermann H., Lukas W.D., Wahlster W. Industrie 4.0 : Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution // VDI Nachrichten. 2011. Vol. 13 (1). P. 2–3.

13. Kannus K., Ilvonen I. Future Prospects of Cyber Security in Manufacturing : Findings from a Delphi

Study // Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences. 2018. DOI: 10.125/50488

14. Khalid A., Kirisci P., Khan Z.H., Ghrairi Z., Thoben K.-D., Pannek J. Security framework for industrial collaborative robotic cyber-physical systems // Computers in Industry. 2018. Vol. 97. P. 123–145. DOI: 10.1016/j.compind.2018.02.009

15. Knapp E. D., Langill J. T. Industrial Network Security. Syngress. 2015. DOI: 10.1016/C2013-0-06836-3

16. Koch P. J., van Amstel M. K., Dębska P., Thormann M. A., Tetzlaff A. J., Bøgh S., Chrysostomou D. A Skill-based Robot Co-worker for Industrial Maintenance Tasks // Procedia Manufacturing, 2017. Vol. 11. P. 83–90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.141>

17. Liu C., Xu X. Cyber-physical Machine Tool – The Era of Machine Tool 4.0 // Procedia CIRP. 2017. Vol. 63. P. 70–75. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.078

18. Monostori L., Kádár B., Bauernhansl T., Kondoh S., Kumara S., Reinhart G., Sauer O., Schuh G., Sihn W., Ueda K. Cyber-physical systems in manufacturing // CIRP Annals. 2016. Vol. 65 (2). P. 621–641. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.06.005

19. Motyl B., Baronio G., Uberti S., Speranza D., Filippi S. How will Change the Future Engineer's Skills in the Industry 4.0 Framework? A questionnaire Survey // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11. P. 1501–1509. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.282

20. Oesterreich T. D., Teuteberg F. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0 : a triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry // Computers in Industry. 2016. Vol. 83. P. 121–139. DOI: 10.1016/j.compind.2016.09.006

21. Ooi K.-B., Lee V.-H., Tan G.W.-H., Hew T.-S., Hew J.-J. Cloud computing in manufacturing: the next industrial revolution in Malaysia? // Expert Systems with Applications. 2018. Vol. 93. P. 376–394. DOI: 10.1016/j.eswa.2017.10.009

22. Pedersen M. R., Nalpantidis L., Andersen R. S., Schou C., Bøgh S., Krüger V., Madsen O. Robot skills for

manufacturing : From concept to industrial deployment // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016. Vol. 37. P. 282–291. DOI: 10.1016/j.rcim.2015.04.002

23. Pushpa J., Kalyani S. A. Chapter Three – Using fog computing / edge computing to leverage Digital Twin // Advances in Computers, 2020. Vol. 117 (1). P. 51–77. DOI: 10.1016/bs.adcom.2019.09.003

24. Sharma R., Jabbour C. J. C., de Sousa Jabbour A. B. L. Sustainable manufacturing and industry 4.0 : what we know and what we don't // Journal of Enterprise Information Management. 2020. Vol. 34 (1). P. 230–266. DOI: 10.1108/JEIM-01-2020-0024

25. Sen D., Ozturk M., Vayvay O. An Overview of Big Data for Growth in SMEs // Procedia-Social and Behavioral Sciences. 2016. Vol. 235. P. 159–167. DOI: 10.1016/j.sbspro.2016.11.011

26. Sezer O.B., Dogdu E., Ozbayoglu A. M. Context-Aware Computing Learning, and Big Data in Internet of Things : A Survey // IEEE Internet of Things Journal. 2018. Vol. 5 (1). P. 1–27. DOI: 10.1109/JIOT.2017.2773600

27. Tupa J., Simota J., Steiner F. Aspects of Risk Management Implementation for Industry 4.0 // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11. P. 1223–1230. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.248

28. Trappey A. J. C., Trappey C. V., Govindarajan U. H., Sun J. J., Chuang A. C. A Review of Technology Standards and Patent Portfolios for Enabling Cyber-Physical Systems in Advanced Manufacturing // IEEE Access. 2016. Vol. 4. P. 7356–7382. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2619360

29. Rojas R. A., Rauch E., Vidoni R., Matt D. T. Enabling Connectivity of Cyber-physical Production Systems : A Conceptual Framework // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11. P. 822–829. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.184

30. Wang L., Törngren M., Onori M. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing // Journal of Manufacturing Systems. 2015. Vol. 37. P. 517–527. DOI: 10.1016/j.jmsy.2015.04.008

Фонтана Каринэ Аркадьевна, канд. экон. наук, старший научный сотрудник, Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Российская Федерация

E-mail: fontana@mail.ru

ORCID ID: 0000-0002-8789-8786

Ерзнкян Баграт Айкович, д-р экон. наук, профессор, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории, Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Российская Федерация

E-mail: yerz@cemi.rssi.ru

ORCID ID: 0000-0001-6065-9120

Поступила в редакцию: 31.10.2022

Подписана в печать: 30.11.2022



Industrial Organization

Original article

UDC 330, 338.2, 338.4

DOI: <https://doi.org/10.17308/econ.2022.4/10575>

JEL: B41; L16; L69; O14

Smart Factories and key technologies of Industry 4.0 (review)

K. A. Fontana^{1✉}, B. A. Yerznkyan²

^{1,2} Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences,
47 Nakhimovsky ave., 117418 Moscow, Russian Federation

Subject. Industry 4.0 is an approach to manufacturing based on modern information and digital technologies which secure a higher level of production, promote efficient use of materials, reduce repetitive and hazardous jobs, and contribute to sustainable development. Despite extensive research related to Industry 4.0, there is still no single opinion regarding the terminology and technologies which characterise Industry 4.0 and their impact on modern manufacturing. These aspects prove the importance of the research.

Objectives. The article considers the key Industry 4.0 technologies in terms of their impact on modern manufacturing, in particular in relation to Smart Factories. Understanding of the impact of Industry 4.0 technologies on manufacturing will also facilitate their strategic implementation aimed at achieving sustainability.

Method. The authors used the method of analysis of works by Russian and international scientists dedicated to the studied issue, in particular comparative analysis of case studies and practical experience. They also used general scientific methods and methods of logical and comparative analysis.

Results. The article summarises the results of published studies. The authors emphasise the importance of understanding the impact of Industry 4.0 technologies (as a single set) on modern manufacturing, the transition to Smart Factories, and sustainability in the economic, social, and environmental spheres due to increasingly efficient use of resources. The paper also considers key technologies that characterise Industry 4.0 and all together form the foundation for Smart Factories. It emphasises that when applied to manufacturing processes, a full-scale implementation of Industry 4.0 technologies makes manufacturing smart and adaptive. It also defines the cyber-physical system as an important element of Smart Factories.

Results and discussion. The paper emphasises that an integrated implementation of Industry 4.0 technologies is a tool for digital and smart manufacturing that provides the manufacturer with valuable information about the product lifecycle, helps them implement new business models, and connects different manufacturing facilities and events with due account of the time horizon.

Conclusions. It is important to study not only the effectiveness of introduced technologies in each individual case, but also to analyse the impact of Industry 4.0 technologies on manufacturing as a whole. The authors emphasise that the interaction of Industry 4.0 technologies contributes to the creation and development of a new production ecosystem, Smart Factories. They justify the need to identify potential barriers limiting the integration of Industry 4.0 technologies in the considered processes (in particular, the transition to Smart Factories is impossible if enterprises have not passed the stage of digitalisation. Therefore, it is important to create conditions that allow enterprises to reach the modern level of digital manufacturing).

Keywords: sustainable development, manufacturing, strategic implementation, key technologies, cyber-physical system.

For citation: Fontana, K. A. & Yerznkyan, B. A. (2022) Smart Factories and key technologies of Industry 4.0 (review). *Proceedings of Voronezh State University. Series: Economics and Management*. (4), 53–67. DOI: <https://doi.org/10.17308/econ.2022.4/10575>

Acknowledgements

This report was presented for comment to the international scientific school-seminar named after academician S. S. Shatalin "System modeling of socio-economic processes" at its forty-fifth session (October 3–9, 2022). The authors are grateful to the school-seminar organizing

committee for recommendation to publish the results of the study.

Conflict of interest

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

References

1. Radov, K. S., Tugarin, S. V., Korovina, A. A. & Kuznetsov, M. O. (2021) Features of Integration of Advanced Information and Intelligent Technologies into Global Industrial and Economic Systems. *Moscow economic journal*. (9), 617–623. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10564. (In Russian)
2. Fontana, K. A. & Yerznkyan, B. H. (2022) The potential of a circular economy and "nature-based solutions" as a possibility to achieve sustainable development. *Economic Analysis: Theory and Practice*. 21 (4), 616–642. DOI: 10.24891/ea.21.4.616. (In Russian)
3. Alcácer, V. & Cruz-Machado, V. (2019) Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 22 (3), 899–919. DOI: 10.1016/j.jestch.2019.01.006
4. Andulkar, M., Le, D.T. & Berger, U. (2018) A multi-case study on Industry 4.0 for SME's in Brandenburg, Germany. *Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences*. DOI: 10.24251/HICSS.2018.574
5. Bocciarelli, P., D'Ambrogio, A., Giglio, A. & Paglia, E. (2017) A BPMN extension for modeling Cyber-Physical-Production-Systems in the context of Industry 4.0. 2017 IEEE 14th International Conference on Networking, *Sensing and Control (ICNSC), May 2017, Calabria*. 599–604. DOI: 10.1109/ICNSC.2017.8000159
6. Cemernek, D., Gursch, H. & Kern, R. (2017) Big Data as a promoter of industry 4.0: Lessons of the semiconductor industry. 2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Emden, Germany, 24–26 July 2017. 239–244. DOI: 10.1109/INDIN.2017.8104778
7. Chang, J., He, J., Mao, M., Zhou, W., Lei, Q., Li, X., Li, D., Chua, C.-K. & Zhao, X. (2018) Advanced Material Strategies for Next-Generation Additive Manufacturing. *Materials*. 11 (1), 166, DOI: 10.3390/ma11010166
8. Evans, P. C. & Annunziata, M. (2012) *Industrial Internet: Pushing the boundaries of minds and machines*. General Electric.
9. Feng, Y. & Huang, B. (2018) A hierarchical and configurable reputation evaluation model for cloud manufacturing services based on collaborative filtering. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 94, 3327–3343. DOI: 10.1007/s00170-017-0662-x
10. Humayed, A., Lin, J., Li, F. & Luo, B. (2017) Cyber-Physical Systems Security – A Survey. *IEEE Internet of Things Journal*. 4 (6), 1802–1831. DOI: 10.1109/JIOT.2017.2703172.
11. Jian, J. R. (2017) An improved cyber-physical systems architecture for Industry 4.0 smart factories. 2017 International Conference on Applied System Innovation (ICASI), 13–17 May 2017, Sapporo Japan. 918–920. DOI: 10.1109/ICASI.2017.7988589
12. Kagermann, H., Lukas, W. D. & Wahlster, W. Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. *VDI Nachrichten*. 2011. 13 (1), 2–3. (In German)
13. Kannus, K. & Ilvonen, I. (2018) Future Prospects of Cyber Security in Manufacturing: Findings from a Delphi Study. *Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences*. DOI: 10.1251/50488
14. Khalid, A., Kirisci, P., Khan, Z. H., Ghrairi, Z., Thoben, K.-D. & Pannek, J. (2018) Security framework for industrial collaborative robotic cyber-physical systems. *Computers in Industry*. 97, 123–145. DOI: 10.1016/j.compind.2018.02.009
15. Knapp, E. D., & Langill, J. T. (2015). *Industrial Network Security*. Syngress. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2013-0-06836-3>
16. Koch, P. J., van Amste, I. M. K., Dębska, P., Thormann, M. A., Tetzlaff, A. J., Bøgh, S. & Chrysostomou, D. (2017) A Skill-based Robot Co-worker for Industrial Maintenance Tasks. *Procedia Manufacturing*. 11, 83–90. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.141
17. Liu, C. & Xu, X. (2017) Cyber-physical Machine Tool – The Era of Machine Tool 4.0. *Procedia CIRP*. 63, 70–75, DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.078
18. Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumar, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W. & Ueda, K. (2016) Cyber-physical

- systems in manufacturing. *CIRP Annals*. 65 (2), 621–641. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.06.005
19. Motyl, B., Baronio, G., Uberti, S. Speranza, D. & Filippi, S. (2017) How will Change the Future Engineer's Skills in the Industry 4.0 Framework? A questionnaire Survey. *Procedia Manufacturing*. 11, 1501–1509. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.282
20. Oesterreich, T. D. & Teuteberg, F. (2016) Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: a triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*. 83, 121–139. DOI: 10.1016/j.compind.2016.09.006
21. Ooi, K.-B., Lee, V.-H., Tan, G.W.-H., Hew, T.-S. & Hew, J.-J. (2018) Cloud computing in manufacturing: the next industrial revolution in Malaysia? *Expert Systems with Applications*. 93, 376–394. DOI: 10.1016/j.eswa.2017.10.009
22. Pedersen, M. R., Nalpantidis, L., Andersen, R. S., Schou, C., Bøgh, S., Krüger, V. & Madsen, O. (2016) Robot skills for manufacturing: From concept to industrial deployment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 37, 282–291. DOI: 10.1016/j.rcim.2015.04.002
23. Pushpa, J. & Kalyani, S. A. (2020) Chapter Three – Using fog computing/edge computing to leverage Digital Twin. *Advances in Computers*. 117 (1), 51–77. DOI: 10.1016/bs.adcom.2019.09.003
24. Rojas, R. A., Rauch, E., Vidoni, R. & Matt, D. T. (2017) Enabling Connectivity of Cyber-physical Production Systems: A Conceptual Framework. *Procedia Manufacturing*. 11, 822–829. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.184
25. Sen, D., Ozturk, M. & Vayvay, O. (2016) An Overview of Big Data for Growth in SMEs. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 235, 159–167. DOI: 10.1016/j.sbspro.2016.11.011
26. Sezer, O. B., Dogdu, E. & Ozbayoglu, A. M. (2018) Context-Aware Computing Learning, and Big Data in Internet of Things: A Survey. *IEEE Internet of Things Journal*. 5 (1), 1–27. DOI: 10.1109/IIOT.2017.2773600
27. Sharma, R., Jabbour, C. J. C. & de Sousa Jabbour, A. B. L. (2020) Sustainable manufacturing and industry 4.0: what we know and what we don't. *Journal of Enterprise Information Management*. 34 (1), 230–266. DOI: 10.1108/JEIM-01-2020-0024
28. Trappey, A. J. C., Trappey, C. V., Govindarajan, U. H., Sun, J. J. & Chuang, A. C. (2016) A Review of Technology Standards and Patent Portfolios for Enabling Cyber-Physical Systems in Advanced Manufacturing. *IEEE Access*. 4, 7356–7382. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2619360
29. Tupa, J., Simota, J. & Steiner, F. (2017) Aspects of Risk Management Implementation for Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*. 11, 1223–1230. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.248
30. Wang, L., Törngren, M. & Onori, M. (2015) Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*. 37, 517–527. DOI: 10.1016/j.jmsy.2015.04.008

Karine A. Fontana, Cand. Sci. (Econ.), Senior Researcher, Central Economics and Mathematics Institute of RAS, Moscow, Russian Federation
E-mail: fontana@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-8789-8786

Bagrat H. Yerznkyan, Dr. Sci. (Econ.), Full Prof., Principal Researcher, Head of Lab., Central Economics and Mathematics Institute of RAS, Moscow, Russian Federation
E-mail: yerz@cemi.rssi.ru
ORCID ID: 0000-0001-6065-9120

Received: 31.10.2022

Accepted: 30.11.2022