

**ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ КАК ИНСТРУМЕНТ МОНИТОРИНГА
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ИНДУСТРИИ 4.0**

© 2023 Р.А. Халиулин

Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

Статья поступила в редакцию 13.02.2023

В статье представлено описание трендов применения цифровых технологий в производственных процессах в промышленном комплексе российской экономики в условиях индустрии 4.0. В частности, проведен динамический анализ внутренних затрат на развитие цифрового производства; представлены структура затрат на развитие цифрового производства и структура использования цифровых технологий на предприятиях промышленного производства; выявлены тренды доли промышленных организаций, использующих специальные программные средства по управлению производством - CRM, ERP, SCM – системы, системы автоматизированного управления производством, системы проектирования производственно-технологических процессов. Цель статьи заключается в обобщении направлений развития индустрии 4.0 в сфере промышленного производства российской экономики с акцентом на возможности и перспективы совершенствования технологий использования цифровых двойников как инструмента мониторинга процесса производства в цепочках создания стоимости продукции. Особое место в статье отведено анализу и перспективам внедрения в промышленном комплексе цифровых двойников и цифровых теней, как инструментов мониторинга на стадиях проектирования изделия и последующего его производства и эксплуатации. Представлена обобщенная схема использования инструментов мониторинга производственного процесса с применением программно-технологической платформы. По результатам исследования сделаны выводы: во-первых, в российской промышленности отмечается ежегодный рост использования цифровых технологий по всем этапам жизненного цикла изделий, в том числе в рамках интегрированных цепочек создания добавленной стоимости; во-вторых, цифровые технологии в настоящее время используются как необходимый инструмент для повышения конкурентоспособности промышленного производства, повышения его ресурсоэффективности, гибкости, точности и оперативности принимаемых управленческих решений; в-третьих, решающее значение в ближайшее время будут иметь интегрированные платформенно-технологические решения, позволяющие создавать сквозные физические и информационные потоки, направленные на формирование и развитие передовых производств и технологий в промышленном комплексе.

Ключевые слова: цифровой двойник, мониторинг, индустрия 4.0, промышленное производство, цифровая тень, программно-технологическая платформа, производственный процесс, цифровое производство.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-2-45-50

EDN: DSPFFQ

ВВЕДЕНИЕ

Последнее десятилетие ознаменовалось бурным развитием четвертой промышленной революции, что явилось основанием радикального перепроектирования производственно-технологических цепочек, трансформации бизнес-моделей, моделей и способов производства. Появление новых технологий управления производственными процессами в настоящее время сочетает в себе черты технологических и организационно-управленческих инноваций, платформенных цифровых решений и интегрированных цепочек создания стоимости конечной продукции. В этой связи предъявляются новые требования к системам мониторинга производственных процессов, которые должны отражать тенденции современных

технологических и цифровых трансформаций производственных систем. Одним из инструментов мониторинга производственных процессов в индустрии 4.0 могут рассматриваться цифровые двойники изделий, которые аккумулируют поток данных о реальном производственном объекте и позволяет в режиме оперативности с высокой степенью точности принимать управленческие решения, направленные на повышение безопасности и эффективности производства. Исходя из представленной актуальности тематики данного исследования, цель статьи заключается в обобщении направлений развития индустрии 4.0 в сфере промышленного производства российской экономики с акцентом на возможности и перспективы совершенствования технологий использования цифровых двойников как инструмента мониторинга процесса производства в цепочках создания стоимости продукции.

Халиулин Равиль Афтахович, аспирант кафедры логики и управления. E-mail: rav.haliulin@yandex.ru

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Методологическую основу исследования составили следующие группы методов:

- общенаучные методы, в частности обобщения, анализа, синтеза, сравнительного анализа, бенчмаркинга;
- частно-научные методы, среди которых – визуальный анализ данных, графический анализ, анализ трендов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Вопросы развития индустрии 4.0 нашли достойное место в исследованиях российских ученых. В частности, следует указать на такие важные направления изучения в данной области, как стандартизация производства в условиях четвертой промышленной революции [1], цифровая трансформация промышленных предприятий [2], экспансия экспертной деятельности в использовании Больших данных [3], специфика бережливого производства в индустрии 4.0 [4,5], технологический суверенитет в эпоху технологических трансформаций [6], технологические вызовы и угрозы четвертой промышленной революции [7], конкурентоспособность промышленного комплекса [8] и др.

Применительно к сфере промышленного производства российской экономики следует отметить, что развитие индустрии 4.0 отражает общемировые тенденции и характеризуется ежегодным приростом вклада добавленной стоимости от цифровой трансформации. По предварительным данным, внутренние затраты на развитие цифрового производства в российской экономике в 2022 г. превысили 3,5 трлн. рублей,

что больше показателя 2017 г. в 2,1 раза (рис. 1). Однако в отношении к ВВП данный показатель за 2017-2022 г. составлял около 2%.

В структуре внутренних затрат на развитие цифрового производства более трети занимало приобретение оборудования, цифровых установок, около 18 приходилось на затраты по приобретению и установке программного обеспечения и его адаптации под нужды производства; около 12% составляли затраты на оплату услуг электросвязи. В структуре внешних затрат на развитие цифрового производства более половины было отнесено на доработку, обновление и техническую поддержку программного обеспечения; около 20% – на ремонт и модернизацию производственно-технологических линий и оборудования; около 8% – затраты на доступ к внешним банкам данных (рис. 2).

Анализ направлений использования цифровых технологий в промышленности показал, что около четверти приходится на облачные сервисы, чуть менее этой доли – около 22% – на сбор и анализ Больших данных, 17,2% – на цифровые платформы, по 13% – на Интернет вещей и геоинформационные платформы, 10,8% – RFID-технологии (рис. 3).

Положительная динамика характерна по применению промышленными организациями специальных программных средств по управлению производством, таких как автоматизированное производство, проектирование, интегрированные решения по управлению цепочками поставок – CRM, ERP, SCM – системы. 2019 г. показал более высокий прирост по внедрению интегрированных технологий управления цепочками поставок, при этом технологии автоматизированного проектирования,

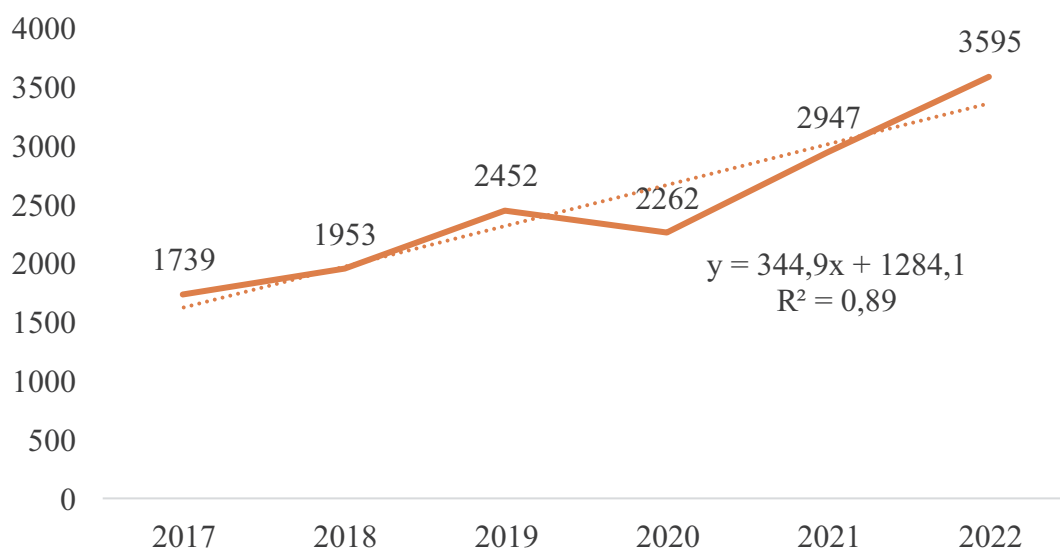


Рис. 1. Динамика внутренних затрат на развитие цифрового производства, млрд. рублей (построено автором по данным [9])



Рис. 2. Структура затрат на развитие цифрового производства, процент (построено автором по данным [10])



Рис. 3. Структура использования цифровых технологий на предприятиях промышленного производства, процент от общего числа промышленных организаций (построено автором по данным [9])

напротив, насколько замедлили темпы роста, что может быть связано частично с изменением методологии расчета данных показателей, начиная с 2019 г. Однако в целом следует указать на положительные тренды применения специализированных программных средств по проектированию и управлению производственно-технологическими процессами на промышленных предприятиях (рис. 4).

Новые требования к системе организации производства ставят в необходимость усиление процессов контроля и мониторинга производственно-технологических цепочек. В этой связи одним из инструментов, позволяющим повысить эффективность мониторинга производственных процессов, влияющим на качество и гибкость принимаемых управленческих процессов в сфере организации производства могут выступать цифровые двойники. В настоящее время в мировой и российской науке, а также в практической деятельности растет интерес к данной области деятельности. В частности, под-

тверждение этому находим в росте количества научных работ по проблематике использования цифровых двойников: например, количество публикаций по вопросам использования цифровых двойников в промышленности, согласно научной электронной библиотеке eLibrary.ru возросло с 14 в 2017 г. до 1259 в 2022 г., рост составил 90 раз [11-15].

Использование цифровых двойников в мониторинге процессов производства является следствием непрерывного совершенствования методов и инструментов разработки промышленной продукции и производственно-инженерной деятельности в целом. Согласно определению ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий» [16] под цифровым двойником изделия понимается система, которая состоит из цифровой модели изделия и информационных потоков, обеспечивающих связь между его составными частями. Следует подчеркнуть, что использование цифровых двойников имеет



Рис. 4. Динамика доли промышленных организаций, использующих специальные программные средства по управлению производством, процент (построено автором по данным [10])

принципиально важное значение в мониторинге на стадии проектирования изделия и последующего запуска в производство опытного образца, что в совокупности позволяет сокращать издержки трансформации производственной системы и повышать эффективность цепи создания стоимости конечной продукции. При этом цифровой двойник изделия на стадии проектирования на стадии производства жизненного цикла и стадии использования продукции трансформируется в цифровую тень, содержащую информацию в виде связей и зависимостей, описывающих поведение реального объекта в нормальном режиме работы, выступая информационной основой предиктивной аналитики для возможных вариантов поведения объекта в различных ситуациях в процессе производства и эксплуатации. Таким образом, и цифровой двойник и цифровая тень выступают как инструмент мониторинга поведения реального промышленного объекта в различных условиях с учетом ограничений и возмущений внутренней и внешней среды (рис. 5).

Проведение аналитических операций с данными, сформированными на основе цифровых двойников и цифровых теней, осуществляется с использованием программно-технологических платформ, которые позволяют осуществлять мониторинг реальных производственно-технологических процессов и изделий благодаря применению таких средств мониторинга, как программное обеспечение компьютерного моделирования, проектный менеджмент, каталогизация и передача результатов компьютерного моделирования, база инженерных расчетов защита данных, техническое обслуживание и ремонт, распределенный реестр использования результатов моделирования и эксплуатации изделия и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенное исследование позволяет резюмировать следующие выводы. В российской промышленности отмечается ежегодный рост использования цифровых технологий по всех этапах жизненного цикла изделий, в том числе в рамках интегрированных цепочек создания добавленной стоимости. Можно заключить, что цифровые технологии в настоящее время используются как необходимый инструмент для повышения конкурентоспособности промышленного производства, повышения его ресурсоэффективности, гибкости, точности и оперативности принимаемых управленческих решений. На стадиях проектирования, а также на стадиях производства и эксплуатации изделий возрастает роль цифровых двойников и цифровых теней, позволяющих проводить мониторинг качества процессов проектирования и выпускаемой промышленной продукции. При этом решающее значение в ближайшее время будут иметь интегрированные платформенно-технологические решения, позволяющие создавать сквозные физические и информационные потоки, направленные на формирование и развитие передовых производств и технологий в промышленном комплексе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сырицкий, А.Б. Четвертая промышленная революция: цифровое производство и промышленный интернет вещей / А.Б. Сырицкий, К.Г. Потапов, М.И. Киселев, А.С. Комшин // Стандарты и качество. – 2018. – № 6. – С. 64-68.
2. Голов, Р.С. Технологии цифровой трансформации промышленных предприятий в условиях четвертой промышленной революции / Р.С. Голов, В.В.

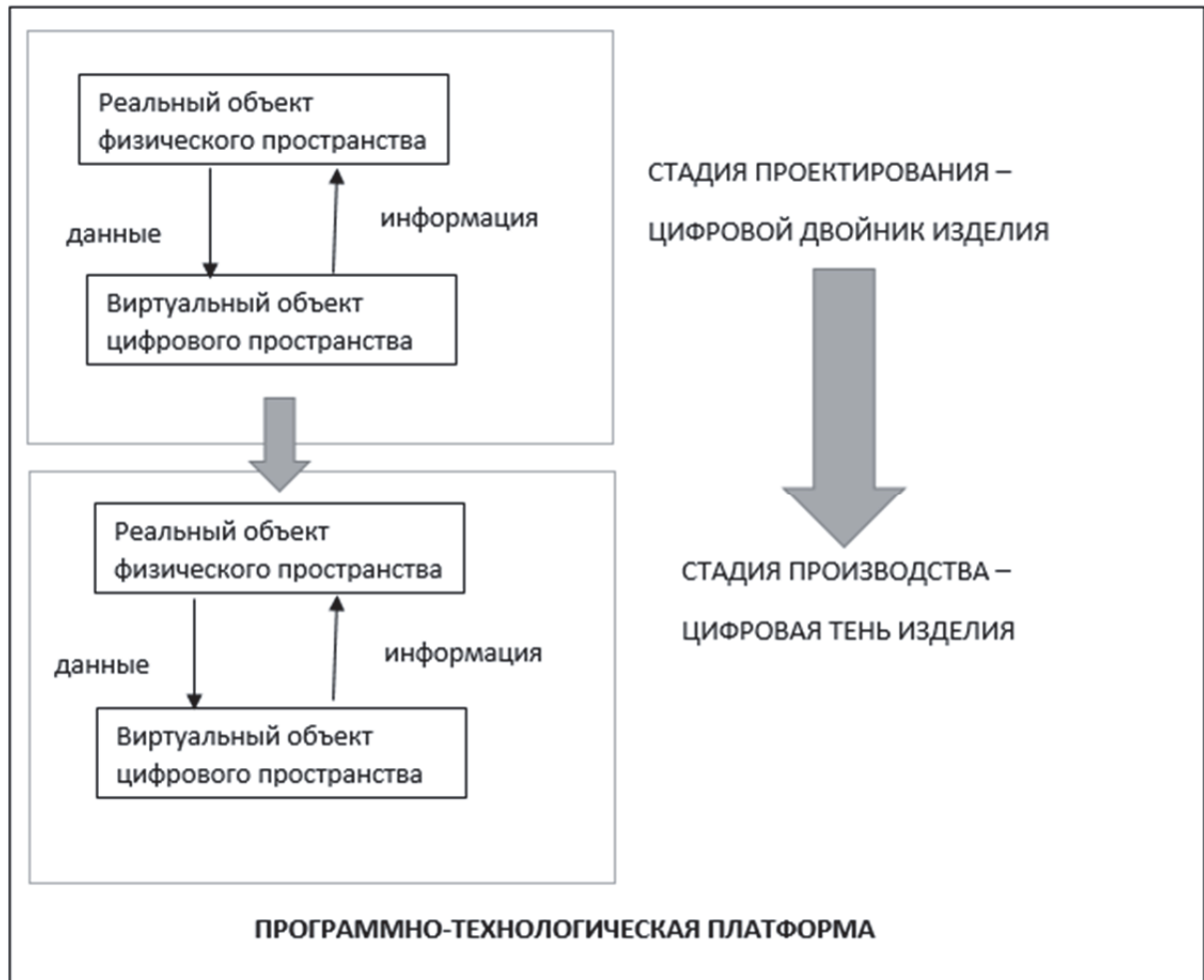


Рис. 5. Инструменты мониторинга производственного процесса с использованием программно-технологической платформы (построено автором)

3. Горбунов, Д.В. Экспансия экспертной деятельности при развитии технологий Big Data в условиях четвертой промышленной революции / Д.В. Горбунов, А.Я. Дмитриев, Т.А. Митрошкина // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. – 2022. – Т. 13. – № 1. – С. 17-24.
4. Хомяков, Н.В. Применение системы бережливого производства в четвертой промышленной революции / Н.В. Хомяков, П.А. Сидоров // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 1 (127). – С. 84-87.
5. Барсегян Н.В. Специфика бережливой организации структуры управления нефтехимическим предприятием / Н.В. Барсегян // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – Т. 22. – № 2 (94). – С. 100-106.
6. Андреев, В.Н. Четвертая промышленная революция и цифровая трансформация: технологический суверенитет и повышение конкурентоспособности предприятий / В.Н. Андреев, Е.Д. Коршунова, Г.Д. Волкова, С.В. Лукина, В.Р. Алиев // Российский экономический интернет-журнал. – 2022. – № 3.
7. Прудкий, А.С. Потенциальные угрозы реализации четвертой промышленной революции / А.С. Прудкий, Н.С. Шайтура // Славянский форум. – 2022. – № 4 (38). – С. 289-301.
8. Кандилов, В.П. Инновационная активность и конкурентоспособность экономики Республики Татарстан / В.П. Кандилов, О.М. Краснова, С.С. Кудрявцева // Вопросы статистики. – 2013. – № 4. – С. 61-69.
9. Абдрахманова, Г.И. Цифровая экономика: 2022: краткий статистический сборник / Г.И. Абдрахманова, С.А. Васильковский и др. – М.: НИУ ВШЭ, 2022. – 124 с.
10. Росстат [Электронный ресурс] – URL: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения 12.03.2023).
11. Пудовкина, О.Е. Методический подход к созданию представлений цифрового двойника в рамках концепции «цифрового производства» / О.Е. Пудовкина, Е.А. Балашова, Е.О. Бобков // Отходы и ресурсы. – 2022. – Т. 9. – № 1.
12. Кошелева, О.Э. Роль интеллектуальных ресурсов России в расширении сферы применения цифровых двойников и ускорении цифрового прогресса / О.Э. Кошелева, А.О. Павлова // Бюллетень инновационных технологий. – 2022. – Т. 6. – № 4 (24). – С. 29-33.
13. Холопов, В.А. Методика создания цифрового двойника параметризованной системы базирования заготовок / В.А. Холопов, С.С. Жлуктов, Е.В. Копытова, М.А. Макаров // Автоматизация. Современные технологии. – 2022. – Т. 76. – № 11. – С. 490-493.
14. Салов, И.В. Применение цифровых двойников и киберфизических систем на объектах генерации тепловой и электрической энергии / И.В. Салов, И.А. Щербатов, Ю.А. Салова // International Journal of Open Information Technologies. – 2022. – Т. 10. – № 3. – С. 57-62.
15. ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий» [Электронный ресурс] – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/758/75810.pdf> (дата обращения 10.03.2023).

REFERENCES

1. Syrickij, A.B. Chetvertaya promyshlennaya revolyuciya: cifrovoe proizvodstvo i promyshlennyj internet veshchej / A.B. Syrickij, K.G. Potapov, M.I. Kiselev, A.S. Komshin // Standarty i kachestvo. – 2018. – № 6. – S. 64-68.
2. Golov, R.S. Tekhnologii cifrovoj transformacii promyshlennyh predpriyatij v usloviyah chetvertoj promyshlennoj revolyucii / R.S. Golov, V.V. Mysl'nik // STIN. – 2022. – № 5. – S. 56-57.
3. Gorbunov, D.V. Ekspansiya ekspertnoj deyatel'nosti pri razvitii tekhnologii Big Data v usloviyah chetvertoj promyshlennoj revolyucii / D.V. Gorbunov, A.YA. Dmitriev, T.A. Mitroshkina // Vestnik Samarskogo universiteta. Ekonomika i upravlenie. – 2022. – T. 13. – № 1. – S. 17-24.
4. Homyakov, N.V. Primenenie sistemy berezhlivogo proizvodstva v chetvertoj promyshlennoj revolyucii / N.V. Homyakov, P.A. Sidorov // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2022. – № 1 (127). – S. 84-87.
5. Barsegyan N.V. Specifika berezhlivoj organizacii struktury upravleniya neftekhimicheskim predpriyatim / N.V. Barsegyan // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – 2020. – T. 22. – № 2 (94). – S. 100-106.
6. Andreev, V.N. Chetvertaya promyshlennaya revolyuciya i cifrovaya transformaciya: tekhnologicheskij suverenitet i povyshenie konkurentosposobnosti predpriyatij / V.N. Andreev, E.D. Korshunova, G.D. Volkova, S.V. Lukina, V.R. Aliev // Rossijskij ekonomicheskij internet-zhurnal. – 2022. – № 3.
7. Prudkij, A.S. Potencial'nye ugrozy realizacii chetvertoj promyshlennoj revolyucii / A.S. Prudkij, N.S. SHajtura // Slavjanskij forum. – 2022. – № 4 (38). – S. 289-301.
8. Kandilov, V.P. Innovacionnaya aktivnost' i konkurentosposobnost' ekonomiki Respubliki Tatarstan / V.P. Kandilov, O.M. Krasnova, S.S. Kudryavceva // Voprosy statistiki. – 2013. – № 4. – S. 61-69.
9. Abdrahmanova, G.I. Cifrovaya ekonomika: 2022: kratkij statisticheskij sbornik / G.I. Abdrahmanova, S.A. Vasil'kovskij i dr. – M.: NIU VSHE, 2022. – 124 s.
10. Rosstat [Elektronnyj resurs] – URL: <https://rosstat.gov.ru> (data obrashcheniya 12.03.2023).
11. Pudovkina, O.E. Metodicheskij podhod k sozdaniyu predstavlenij cifrovogo dvojnika v ramkah koncepcii "cifrovogo proizvodstva" / O.E. Pudovkina, E.A. Balashova, E.O. Bobkov // Othody i resursy. – 2022. – T. 9. – № 1.
12. Kosheleva, O.E. Rol' intellektual'nyh resursov Rossii v rasshirenii sfery primeneniya cifrovyyh dvojniov i uskorenii cifrovogo progressa / O.E. Kosheleva, A.O. Pavlova // Byulleten' innovacionnyh tekhnologij. – 2022. – T. 6. – № 4 (24). – S. 29-33.
13. Holopov, V.A. Metodika sozdaniya cifrovogo dvojnika parametrizovannoj sistemy bazirovaniya zagotovok / V.A. Holopov, S.S. ZHluktoy, E.V. Kopytova, M.A. Makarov // Avtomatizaciya. Sovremennye tekhnologii. – 2022. – T. 76. – № 11. – S. 490-493.
14. Salov, I.V. Primenenie cifrovyyh dvojniov i kiberfizicheskikh sistem na ob'ektah generacii teplovoj i elektricheskoy energii / I.V. Salov, I.A. SHHerbatov, YU.A. Salova // International Journal of Open Information Technologies. – 2022. – T. 10. – № 3. – S. 57-62.
15. GOST R 57700.37-2021 «Komp'yuternye modeli i modelirovanie. Cifrovye dvojniov i izdelij» [Elektronnyj resurs] – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/758/75810.pdf> (data obrashcheniya 10.03.2023)..

DIGITAL TWINS AS A TOOL FOR MONITORING PRODUCTION PROCESSES IN INDUSTRY 4.0

© 2023 R.A. Khaliulin

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

The article presents a description of the trends in the use of digital technologies in production processes in the industrial complex of the Russian economy in the conditions of industry 4.0. In particular, a dynamic analysis of internal costs for the development of digital production was carried out; the cost structure for the development of digital production and the structure of the use of digital technologies in industrial production enterprises are presented; trends in the share of industrial organizations using special software for production management - CRM, ERP, SCM - systems, automated production control systems, systems for designing production and technological processes have been identified. The purpose of the article is to summarize the directions of development of industry 4.0 in the industrial production of the Russian economy, with an emphasis on the possibilities and prospects for improving the technologies for using digital twins as a tool for monitoring the production process in the value chains of products. A special place in the article is given to the analysis and prospects for the introduction of digital twins and digital shadows in the industrial complex as monitoring tools at the stages of product design and its subsequent production and operation. A generalized scheme for using tools for monitoring the production process using a software and technological platform is presented. Based on the results of the study, the following conclusions were drawn: firstly, in the Russian industry there is an annual increase in the use of digital technologies at all stages of the life cycle of products, including within integrated value chains; secondly, digital technologies are currently used as a necessary tool for increasing the competitiveness of industrial production, increasing its resource efficiency, flexibility, accuracy and efficiency of managerial decisions; thirdly, in the near future, integrated platform and technological solutions will be of decisive importance, allowing the creation of end-to-end physical and information flows aimed at the formation and development of advanced industries and technologies in the industrial complex.

Keywords: digital twin, monitoring, industry 4.0, industrial production, digital shadow, software and technology platform, production process, digital production.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-2-45-50

DSPFFQ