

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОЙ АНАЛИТИКЕ И РЕШЕНИИ БИЗНЕС-ЗАДАЧ

Андрей Анатольевич ГОРБАТИКОВ¹, к.э.н.

Александр Сергеевич МИКУЛЕНКОВ^{2,3}

¹Исполнительный директор Научно-исследовательского и инжинирингового центра инновационных технологий МФТИ, заместитель директора Бизнес-школы высоких технологий Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), г. Долгопрудный

Адрес для корреспонденции: А.А. Горбатилов, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9

Тел.: +7 (498) 713-91-83. E-mail: gorbatikov.aa@mipt.ru

²Директор Центра науки и технологий искусственного интеллекта Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), г. Долгопрудный

³Научный стажер АНО ВО «Международный банковский институт имени Анатолия Собчака», Санкт-Петербург, Россия

Адрес для корреспонденции: А. С. Микуленков, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9.

Тел: +7 (498) 713-91-81. E-mail: mikulenkov@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена обзору технологий «цифровых двойников». Рассматриваются основные элементы технологического перехода к Индустрии 4.0. Перечислены характерные черты, отличающие «цифрового двойника» от первоисточника. Описана методология создания и основные задачи технологии «цифровой двойник» в целях промышленной автоматизации или предсказательной аналитики. Авторами определены задачи, которые решают «цифровые двойники». Представлен мировой и российский опыт создания «предсказательной аналитики» и разработки «высокоадекватных цифровых моделей» реальных объектов и процессов физического мира.

Ключевые слова

«Цифровой двойник», искусственный интеллект, большие данные, моделирование.

APPLICATION OF DIGITAL TWIN TECHNOLOGIES IN PREDICTIVE ANALYTICS AND SOLVING BUSINESS PROBLEMS

Andrey GORBATIKOV¹, PhD in Economics

Aleksandr MIKULENKOV^{2,3}

¹Executive Director, the Research and Engineering Center for Innovative Technologies, Moscow Institute of Physics and Technology, Deputy Director, Business School of High Technologies, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny
Address for correspondence: A.A. Gorbatikov, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russian Federation

Tel: +7 (498) 713-91-83. E-mail: gorbatikov.aa@mipt.ru

²Director, Center for Science and Technology of Artificial Intelligence, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

³Scientific intern Autonomous non-profit organization of higher education «International banking Institute named after Anatoliy Sobchak»,
St. Petersburg, Russia

Address for correspondence: A.S. Mikulenkov, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russian Federation

Tel: +7 (498) 713-91-81. E-mail: mikulenkov@gmail.com

Abstract

The article is devoted to a review of the technologies of «digital twins». The main elements of the technological transition to Industry 4.0 are considered. The characteristic features that distinguish the «digital twin» from the original source are listed. The methodology for creating and the main tasks of the digital twin technology for industrial automation or predictive analytics is described. The authors have identified problems that solve «digital twins». The world and Russian experience in creating «predictive analytics» and developing «highly appropriate digital models» of real objects and processes of the physical world is presented.

Keywords

Digital Twin, artificial intelligence, Big Data, modeling.

Введение

Современная мировая экономика переживает этап своего развития, который принято называть «четвертой промышленной революцией», начавшейся в 2000-е годы. Основными элементами Индустрии 4.0 являются: искусственный интеллект с использованием облачных вычислений, больших

данных (Big Data) и «интернета вещей»); дополненная реальность; имитационное моделирование в машиностроении и др. областях с применением метода «цифровых двойников»; автономные устройства и робототехника с сенсорами восприятия окружающей действительности; аддитивное производство; киберфизические сети.

Современные интеграционные системы формируют сетевое взаимодействие участников рынка, влияют на все секторы экономики и переводят промышленные технологии на следующий уровень автоматизации технологических процессов – четвертую ступень.

Результаты исследования. Индустрия 4.0 и метод «цифровых двойников» в рамках задач перехода на автоматизированное производство

Центральным пунктом концепции Индустрии 4.0 является технологическая трансформация и автоматизация производства, управляемого искусственным интеллектом в реальном времени и постоянном взаимодействии с экосистемой цифрового производства [1].

Основные элементы технологического перехода к Индустрии 4.0 представлены на рисунке 1.



Рис. 1. Основные элементы технологического перехода к Индустрии 4.0 [2]

Цифровые технологии все глубже проникают в производственный процесс, стремительно меняют его. К данному виду технологий относится «цифровой двойник», являющийся основой усовершенствованных технологий (Advanced Manufacturing). Рассмотрим его возможности.

Технология «цифровой двойник» (Digital Twin) – это компьютерная модель любого предмета, объекта, процесса. Данная модель досконально повторяет форму, движения оригинала и характеризуются чертами, отличающего его от первоисточника: абстрактностью, синхронизированностью, предсказуемостью [3].

Следует отметить, что виртуальные аналоги реальных объектов в трехмерном измерении смогли продемонстрировать свои суперспособности еще в прошлом веке. Одним из примеров может служить космическая программа «Аполлон-13» (1970 г.), предназначенная для посадки на Луну. НАСА вынуждено было прервать миссию из-за выхода из строя кислородного баллона в сервисном модуле во время полета. Проблема имитации и анализа аварийной ситуации, возможных последствий была решена на аналоговых компьютерах, и экипаж благополучно вернулся на Землю.

Термин «цифровой двойник» впервые был применен в 2010 году при моделировании виртуального космического корабля, который воспроизводил этапы строительства, испытаний и полетов [4].

Аналитика, составленная и представленная Федеральным институтом промышленной собственности (ФИПС РФ) по «патентному ландшафту» демонстрирует, что интерес к данной технологии, начиная с 2009 г., проявляли разработчики, а с 2013 года на карте обладателей прав появляются крупнейшие мировые технологические компании – мировые лидеры, такие как IBM и General Electric (рисунок 2).

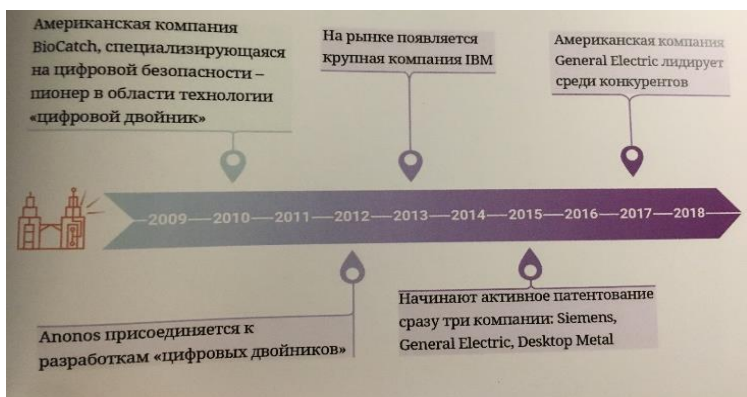
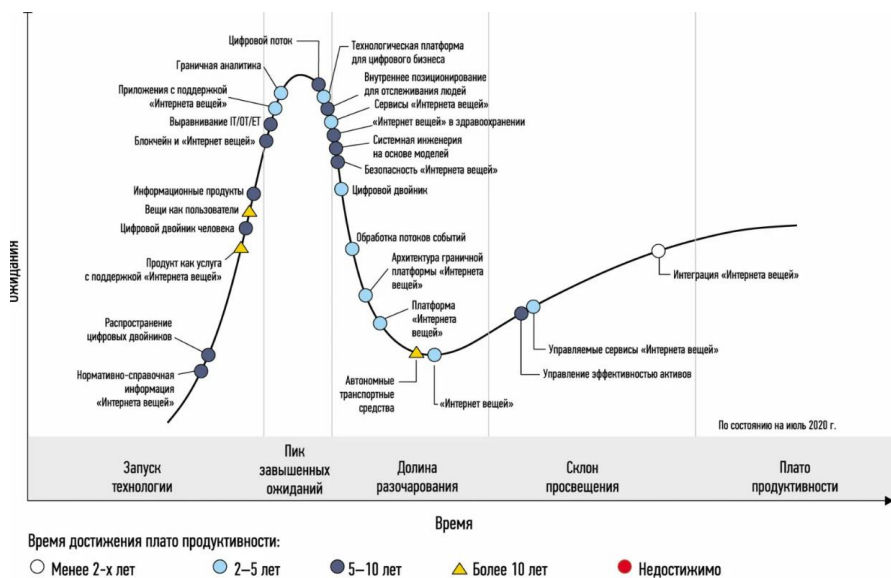


Рис. 2. Хронология появления участников рынка «цифровых двойников», выявленных на базе «патентной аналитики»

Источник: ФИПС, Роспатент, 2019 г.

На диаграмме, приведенной ниже (рис. 3) и составленной исследовательской компанией Gartner, «цифровые двойники» уже преодолели пик ожиданий к новым технологиям, способным оказать значительное влияние на бизнес и общество, и переходят в следующую стадию, которую можно охарактеризовать как проверка технических решений, подтверждение концепции разработки и достижение зрелости технологии. Данные исследований компания предоставляет ежегодно, что позволяет судить о цифровых технологиях, которые в ближайшие 5–10 лет будут влиять на людей, производство и общество.



Источник: Gartner

Рис. 3. Кривая Gartner Hype Cycle на июль 2020 г. [5]

При этом государственные инициативы по развитию передовых производственных технологий в США публично отмечаются с 2004 года (рис. 4).

Государственная программа поддержки данного направления в США называется «Industrial Internet Consortium (Vision and Goals for Advanced Manufacturing)», объединяя задачи цифровой трансформации и кибербезопасности.

Программа «Industrial Internet Consortium (Vision and Goals for Advanced Manufacturing)» не афишируется: на диаграмме Гартнера, на которой по общему представлению должны быть «прозрачно» отражены все тренды ожиданий от сквозных производственных технологий, нет упоминания о технологии «цифровой двойник» до 2016 года.

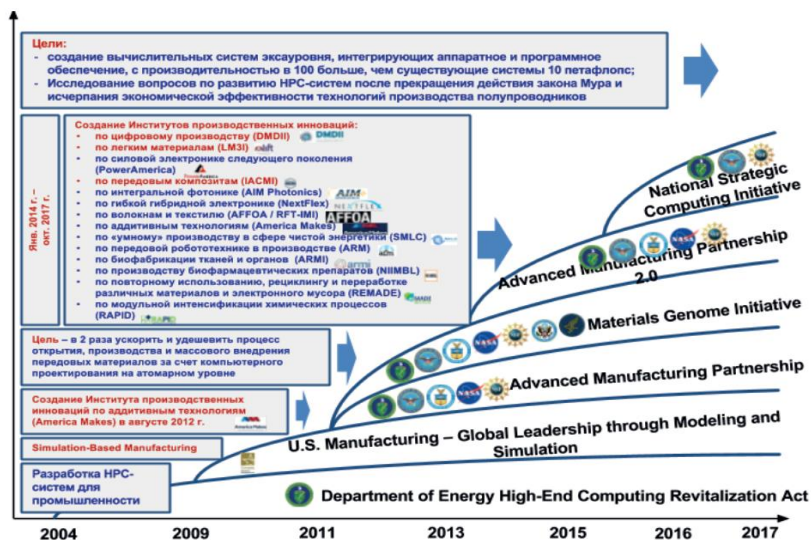


Рис. 4. Государственные инициативы по развитию передовых производственных технологий в США

Технология Digital Twin (являющаяся основой технологии Advanced Manufacturing) единожды появляется на диаграмме в 2016 году, определяя зрелость технологии в 5–10 лет, и потом исчезает, повторяясь уже в 2018 г.

По мнению авторов данной статьи, интерес к цифровым двойникам и в дальнейшем будет только расти по мере увеличения возможностей данной технологии.

Методология создания и основные задачи технологии «цифровой двойник» в целях промышленной автоматизации или предсказательной аналитики

В настоящее время сами технологии искусственного интеллекта (машинное обучение, обработка массивов больших данных) уже является частью или инструментом технологии «цифровой двойник». Именно в их сочетании получается создать следующее поколение систем – интегрированные реконфигурируемые системы систем на основе искусственного интеллекта как надстройки над всеми существующими системами. Такое сочетание создаст эффект предсказательного высокоадекватного моделирования, обеспечивающего существенное преимущество в прогнозировании процессов.

Благодаря таким принципам восприятия искусственного интеллекта как помощника, ускоряющего работу инженера или руководителя, в переборе возможных вариантов и опираясь на библиотеку накопленных данных и опыта предыдущих разработчиков, конструкторов, появляется среда для эффективной работы алгоритмов искусственного интеллекта. При этом благодаря алгоритмам искусственного интеллекта достигается перебор всех возможных вариантов, находятся решения, выходящие за рамки возможностей генерального конструктора или руководителя, достигая эффектов в сценариях, до конца не имеющих еще научного объяснения.

Внимание к технологии «цифровой двойник» связано с тем, что благодаря методологии формируется дерево возможных сценариев решений, накапливаются библиотеки элементов и возможностей по комбинаторике лучших практик, благодаря методологии искусственного интеллекта как помощника инженера или лица, принимающего решение в процессных моделях, достигается эффект «предсказательной аналитики» как множества сценариев, доступных для решения поставленной задачи.

Унифицированный алгоритм создания «цифрового двойника» показан на рисунке 5.

- Модель – это запись в принятой нотации о предмете.
- Модель замещает представление объекта в принятом формате.
- Цифровой двойник— цифровая копия физического объекта или процесса, помогающая оптимизировать эффективность бизнеса.



Рис. 5. Унифицированный алгоритм создания «цифрового двойника»

Вначале разрабатываются требования к «цифровому двойнику», затем, на этапе 2, создается концепт архитектуры виртуальной модели и на этапе 3 – математическая модель двойника. Этапы 4 и 5 предусматривают создание графической 3D-модели; модели на базе «интернета вещей»; интегрированные математические модели – такие как CAE-системы (Computer-aided engineering – решения для инженерного анализа, расчетов и симуляций) для инженерных расчетов; различные технологии визуализации – включая голограммы, AR и VR. Оптимальной погрешностью между работой «цифрового двойника» и его физического прототипа считается 5%.

В основе технологии Digital Twin лежит методология Model Based System Engineering (MBSE) – сценарное предсказательное моделирование управленческих решений как матрица ограничений и поиска локального оптимума. В результате этого на текущем уровне развития программно-аппаратной среды можно создавать не только моносистемы (как BIM-модель, или «цифровой двойник» автомобиля), а перейти на следующий уровень поколения систем – конструктор системы как конфигуратор (архитектор) системы систем (рис. 6).

MBSE – Model based system engineering

От архитектурных и математических моделей к кибермоделям проектирования и управления



Источник: МФТИ, проф. Кондратьев В.В.

Источник: СПбГУ, проф. Балденко В.Л.

BIM 3D* – координированная модель

BIM 4D – 3D + время

BIM 5D – 4D + деньги

BIM 6D – 5D + процессная модель

BIM 7D – эксплуатация и управление объектом

BIM – Building information model

Уровни цифровизации:

- **Проектирования** – BIM технология для проектной документации (**as-designed BIM**);
- **Строительства** – разработка цифрового плана объекта строительства (**as-built BIM**);
- **Эксплуатация** – модели, основанные на текущей ситуации (**as-is BIM**);
- **Утилизация** – на основе проектной документации и актов обследования.

Рис. 6. Архитектурный конфигуратор моделей

Таким образом, технология «цифровой двойник» позволяет сразу перейти к стадии архитектурного конфигуратора системы систем, минуя стадию интегрированной системы, и создавать правила сборки реконфигурируемых интегрированных систем (методология и математика для создания таких систем уже разработана, Россия занимает лидирующие позиции в мире в части методологии построения сложных интегрированных систем).

Для рассмотрения возможных областей применения технологии «цифровой двойник» на практике авторы считают необходимым определиться с тем, какие задачи решают «цифровые двойники». «Цифровой двойник» в первую очередь используется в ситуациях, требующих:

- провести тестовый запуск процесса в условиях ограничения во времени и средствах;
- обнаружить проблему до запуска производства или ввода объекта в эксплуатацию;
- повысить эффективность процесса, отслеживая возможные сбои еще до запуска;
- снизить все виды рисков, связанных с персоналом, производством и финансами;
- моделировать новые характеристики продукта с целью повышения его конкурентоспособности и прибыльности бизнеса;

- построить перспективные планы и прогнозы развития компании или продукта на ближайшие годы;
- повысить прогнозы спроса и отношения клиентов к продукту и его качествам.

Мировой и российский опыт создания «предсказательной аналитики» и разработки «высокоадекватных цифровых моделей» реальных объектов и процессов физического мира

В настоящее время «цифровые двойники» и широко используются в автопроме для моделирования событий, которые могут происходить с оригиналом в различных условиях. При этом экономится время, ресурсы и появляется возможность избежать вреда для людей и окружающей среды.

Крупные технологические компании создают программные платформы для разработки «цифровых двойников». Как лидера среди них можно отметить Azure Digital Twins (Microsoft) – платформу «интернета вещей», которая позволяет создать цифровое представление реальных вещей, городов, зданий, бизнес-процессов и людей, регистрировать историю изменений [6].

Компания Ansys – один из крупнейших в мире поставщиков программного обеспечения для инженерного моделирования. Компания помогает дизайнерам, исследователям, инженерам и производителям создавать цифровые модели, чтобы предсказать, как продукты и процессы будут вести себя в реальных условиях, прежде чем они установят одну гайку или болт. Тем самым Ansys помогает своим клиентам оптимизировать процессы и производить более безопасные и ценные продукты быстрее и с меньшими затратами, будь то реактивный самолет или нефтеперерабатывающий завод [7].

Наиболее последовательное создание инфраструктуры и методологии «цифровых двойников» наблюдается в США, Германии и Франции. При этом данная технология активно применяется автоиндустрией Германии, Японии, Кореи, США и других развитых стран, начиная с 2007 года. Например, в 2007 г. технология «цифровой двойник» была использована концерном BMW при проектировании новых моделей автомобилей, в 2009 г. – Opel, 2009 г. – Tesla, Ford; в 2010 г. – Porsche, Ferrari, став, в том числе, одной из технологий, обеспечивающей снижение времени вывода продукта на рынок с 7 до 1,5 лет, при технологическом усложнении самого изделия.

В настоящее время в автопроме изделие в виде завершенной легковой машины можно в «виртуальных средах» пересчитать за 1 месяц под любые условия функционирования и в любых материалах; и затем, разместив заказ по цепи кооперации, получить ее в реальном физическом виде.

Важно отметить, что в индустриях, где данная технология еще в полной мере не применяется, демонстрируются обратные тренды: происходит значительный сдвиг во времени производства нового изделия: с 5 до 27 лет в военной авиации, в гражданской авиации с 3 до 7,5 лет.

На рис. 7 показана разница во времени между началом разработки и выводом на рынок новых изделий в авиации (гражданской, военной) и автомобилестроении. Статистика с примерами и трендами приведена, начиная с 1945 г.



Рис. 7. Разница в скорости вывода на рынок продуктов

При этом следует отметить, что авиационные проекты имеют на порядок более сложные технологии, количество новых разработок материалов, агрегатов, систем управления (как правило, прорывных) в авиационном изделии существенно больше по сравнению с автомобилестроением.

В качестве примеров российских разработок можно привести некоторые практики лаборатории бизнес-решений на основе искусственного интеллекта:

- предсказание поломок деталей самолета. В основе программного решения, разработанного лабораторией МФТИ, была создана модель цифрового двойника самолета. Для этого использовались данные телеметрии с датчиков самолета и данные об обслуживании самолета, расписании, замене деталей и результатов тестов. В результате проекта было показано предсказание поломок с точностью 70–98%, в зависимости от вида оборудования, за 5–20 полетных циклов;

- Predictive Maintenance (PdM) для заводского оборудования. Алгоритм искусственного интеллекта предсказывает неисправности оборудования с помощью встроеной модели глубокого обучения. Применение нейронных сетей упрощает обработку нестандартных угловых случаев без ручной коррекции. Подключаясь напрямую к контуру управления предприятием через протокол Modbus, он передает результаты прогнозирования непосредственно в SCADA. Эта система может работать с различными типами датчиков (например, ПИД-регуляторами), контурами управления и асимметричными информационными моделями, частично поврежденными или неактивными датчиками. Наконец, искусственный интеллект может идентифицировать причины отказов с высокой точностью (например, 81% отказов с точностью 92% в течение часа до отказа).

- опыт создания элементов интегрированной системы систем в России. Например, Инжиниринговый центр СПбПУ Петра Великого пошел не путем создания отдельных собственных аналитических софтов, а сразу перешел на следующее поколение программного продукта, создав отечественную мультидисциплинарную надстройку над известными программными продуктами в области создания Digital Twin, обеспечив комплексирование программных решений ведущих мировых вендоров (более 300), общие инвестиции мировых вендоров в разработку которых составили более 100 млрд долларов и общая трудоемкость разработки и сопровождения которых превышает 1000000 человеко-лет. Разработка данного программного продукта – цифровой испытательный полигон – силами СПбПУ и ведущих центров НТИ по состоянию на 2018 г. не превысила нескольких сот миллионов рублей.

Российская компания Dilibrium разрабатывает «цифровых двойников» и специализируется на моделировании погрузочных терминалов, производственных линий, аэропортов, складов, дорожном движении на

перекрестках. Имитационное моделирование выполняется в виртуальной среде AnyLogic и AnyLogistix™, которая позволяет проанализировать большое количество возможных сценариев, прогнозировать поведение исследуемого объекта во времени, в динамике. Данные экономические показатели бизнеса (включая производительность) получаются более точными в сравнении с аналитическими моделями.

Выводы

Технология «цифровой двойник» в стратегиях научно-технологического развития многих стран обозначена как фактор, радикально меняющий существующее положение дел в экономическом развитии. «Виртуальные полигоны» на базе технологии Digital Twin обеспечивают технологический переход на новый уровень промышленных технологий, в том числе «природоподобных», создающих возможности для развития всех секторов экономики.

В условиях, когда производственный процесс стремительно меняется, и в него все глубже проникают «цифровые технологии», ведущие машиностроительные предприятия, добывающие компании стараются удержаться в лидерах отрасли, внедряя у себя новые инструменты автоматизации и управления техпроцессом, в том числе с применением цифровых двойников, повышая свою операционную эффективность.

Алгоритмы искусственного интеллекта (модели нейронных сетей) при поиске вариантов могут создавать несуществующие сценарии с несуществующими ресурсами, тем самым обуславливая требования к новым материалам и новым технологическим процессам, обеспечивая безопасность работы в реальном мире.

Технология создания «цифровых двойников» пока только разрабатывается, формируются новые инструменты, программные платформы. Данные для виртуальной модели, для ее уточнения поступают от датчиков, обеспечивающих развитие программы IoT. Функционирование такой среды (хранение и обработка больших данных) требует значительных вычислительных ресурсов, центров обработки данных, суперкомпьютеров, которые потребляют высокое количество энергии, что в свою очередь влечет дальнейшее развитие ИТ-инфраструктуры, включая новые технологии связи поколения 5 и 6 G.

Сами интегрированные системы, эти «математические миры» в иных отраслях, кроме автопрома, только тестируются (авиастроение, двигателестроение, робототехника, судостроение, тяжелое машиностроение и др.), а значит, для их создания и управления нужны талантливые инженеры, а создавать и поддерживать систему должны талантливые программисты.

Список источников

1. Современные технологии. Киберфизические системы: учебное пособие / Авт.- сост. Е.И. Громаков, А.А. Сидорова / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – 166 с.

2. Четвертая промышленная революция. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения 04.05.2022).

3. Цифровые двойники – прошлое, настоящее и будущее. URL: <https://habr.com/ru/company/luxoft/blog/519218/> (дата обращения 07.05.2022).

4. Имитационное моделирование. URL: <https://dilibrium.ru/simulation-modeling/> (дата обращения 11.05.2022).

5. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12_december/28/cifrovoy_dvoinik.pdf (дата обращения 12.05.2022).

6. Azure Digital Twins. URL: <https://azure.microsoft.com/ru-ru/services/digital-twins/#features> (дата обращения 15.05.2022).

7. Ansys. URL: <https://www.cadfem-cis.ru/products/ansys/> (дата обращения 15.05.2022).

8. **Sigova M.V.** Adaptive analysis of merchant big data / Surnin, O., Sigova, M., Sitnikov, P., Ivaschenko, A., Stolbova, A. // Communications in Computer and Information Sciences, 2019, 1083, стр. 105–117.

References

1. Sovremennye tekhnologii. Kiberfizicheskie sistemy: uchebnoe posobie / Avt.- sost. E.I. Gromakov, A.A. Sidorova / Tomskij politekhnicheskij universitet. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2021. – 166 s.

2. CHetvertaya promyshlennaya revolyuciya. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (data obrashcheniya 04.05.2022).

3. Cifrovye dvojniki – proshloe, nastoyashchee i budushchee. URL: <https://habr.com/ru/company/luxoft/blog/519218/> (data obrashcheniya 07.05.2022).

4. Imitacionnoe modelirovanie. URL: <https://dilibrium.ru/simulation-modeling/> (data obrashcheniya 11.05.2022).

5. Cifrovye dvojniki v vysokotekhnologichnoj promyshlennosti. URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12_december/28/cifrovoy_dvoinik.pdf (data obrashcheniya 12.05.2022).

6. Azure Digital Twins. URL: <https://azure.microsoft.com/ru-ru/services/digital-twins/#features> (data obrashcheniya 15.05.2022).

7. Ansys. URL: <https://www.cadfem-cis.ru/products/ansys/> (data obrashcheniya 15.05.2022).

8. **Sigova M.V.** Adaptive analysis of merchant big data / Surnin, O., Sigova, M., Sitnikov, P., Ivaschenko, A., Stolbova, A. // Communications in Computer and Information Sciencethis, 2019, 1083, стр. 105–117.