

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, СЦЕНАРИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

М. В. ЦАРЕВ, Ю. С. АНДРЕЕВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: tsarev@tsarevstudio.ru*

Представлен обзор научной литературы по теме „Цифровые двойники в промышленности“ на основе публикаций зарубежных и отечественных исследователей. Рассмотрены процессы зарождения и развития концепции с момента ее появления по настоящее время. Ввиду неоднозначности толкования термина „цифровой двойник“ приведены несколько формулировок и дан их краткий анализ. Отражена классификация цифровых двойников, подходы к их построению и используемые технологии. Сценарии использования рассмотрены на примерах российских и зарубежных компаний. Приведены выводы о перспективности развития данного направления исследований, рассмотрены преимущества и риски внедрения цифровых двойников на промышленных предприятиях.

Ключевые слова: цифровой двойник, моделирование, классификация цифровых двойников, промышленность, технологии, IoT, умное производство, сценарии использования

Введение. Вопрос перехода к высокотехнологичным и эффективным производствам в условиях глобальной конкуренции в последние десятилетия стал особенно актуален. Благодаря стремительному развитию информационных технологий появилась возможность сбора, хранения, передачи и анализа больших массивов данных, что привело к пересмотру стандартных подходов к управлению производственными процессами на предприятиях. В ряде стран мира были разработаны и приняты программы стратегического развития промышленности, например, „Платформа индустрия 4.0“ (Германия), „Сделано в Китае 2025“ (Китай), „Фабрика будущего“ (Франция), „Национальная технологическая инициатива“ (Россия) и др. Все они направлены на повышение производительности труда, внедрение современных наукоемких технологий и повышение экономической эффективности производств.

На практике внедрение этих стратегий проявляется в повышении уровня автоматизации предприятий и в более широкой цифровизации производственных процессов. Фундаментальные причины возникновения подобных изменений кроются в необходимости быстрого и точного моделирования продукта и его производственной технологии с целью экономии ресурсов и сохранения рентабельности производства в современных условиях, когда запрос на выпуск „кастомизированной“ (т.е. индивидуализированной под запросы конкретных потребителей) продукции существенно возрос. Исследователями активно обсуждаются переход к так называемому „умному производству“ („smart manufacturing“) — управлению, основанному на сетевых информационных технологиях и анализе больших объемов данных [1].

Подход, позволяющий объединить различные технологии автоматизации и описывающий процесс взаимодействия между виртуальным (данные, поступающие с датчиков, математические и геометрические модели) и физическим (станки, исполнительные механизмы, роботы) мирами, получил название „Цифровой двойник“ („Digital Twin“ — DT). Компания „Gartner“ (США), которая является ведущей мировой исследовательской и консалтинговой компанией и членом S&P 500, в 2018 г. включила цифровые двойники в список 10 стратегически важных технологий. В компании считают, что к 2021 г. половина крупных промышленных компаний будет использовать цифровые двойники, причем „цифровые двойники в контексте проектов Интернета вещей являются особенно многообещающими в течение следующих трех-пяти лет“ [2].

В настоящей обзорной статье прослеживается история появления и развития концепции цифровых двойников, рассматриваются различные определения и классификации, подходы к построению, а также используемые технологии и сценарии промышленного применения.

Зарождение и развитие концепции. Появление концепции цифровых двойников связывают с работами проф. М. Гривса (M. Grieves). Идея о создании виртуального пространства, в котором происходит обмен информацией с реальным миром, была предложена М. Гривсом в 2002 г. в рамках презентации Мичиганского университета для представителей промышленности [3]. Данная концепция, обозначенная как „идеальная PLM“ (Product Lifecycle Management, PLM — система управления жизненным циклом изделия), проиллюстрирована представленным на презентации слайдом (рис. 1).

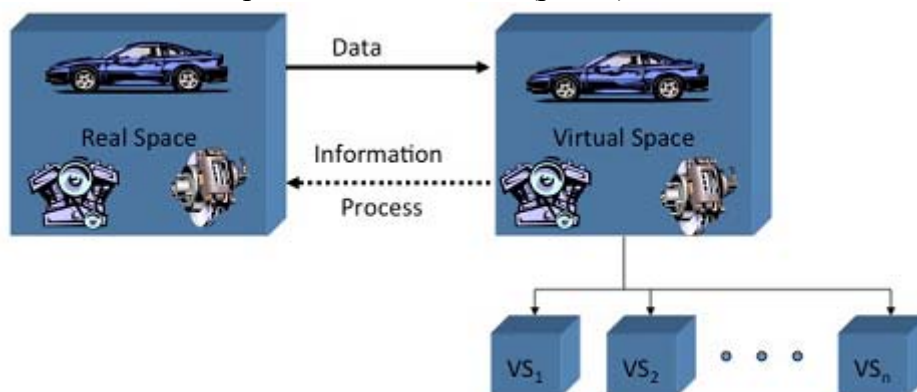


Рис. 1

Позднее М. Гривс развивает эту идею и представляет ее широкой публике в своем курсе по PLM-системам, который он проводил на базе того же университета [4]. Несмотря на то, что сам термин „цифровой двойник“ появился несколько позже, базовая концепция — наличие физического объекта, виртуального объекта и обеспечение обмена информацией между ними — была разработана уже тогда.

В последующие годы одним из названий этой концепции была „модель зеркальных пространств“ („mirrored spaces model“) [5], а в 2006—2010 гг. использовалось понятие „модель информационного зеркала“ („information mirroring model“) [6]. Привычный ныне термин „цифровой двойник“ появляется в 2011 г. [7], М. Гривс приписывает его авторство своему коллеге Дж. Векерсу.

В 2003 г. идея не получила широкой поддержки, что во многом было связано с техническим несовершенством технологий того периода:

- большинство данных хранилось в бумажном виде и обрабатывалось вручную;
- получение и хранение потока различных данных о продукте или технологическом процессе в реальном времени было практически нереализуемо;
- отсутствовало соответствующее аппаратное и программное обеспечение.

Несмотря на разнообразие терминологии, базовая концепция за прошедшие годы практически не претерпела изменений, а вот интерес к ней значительно возрос. После 2011 г. концепция цифровых двойников получила новые возможности для развития — она была доработана Исследовательской лабораторией Военно-воздушных сил США с целью „решения вопросов технического обслуживания и прогнозирования ресурса воздушных судов“ [8]. В 2012 г. цифровой двойник был официально представлен общественности в „дорожной карте“ моделирования, симуляции, информационных технологий и обработки, выпущенной NASA (National Aeronautics and Space Administration — Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, США) [9]. В 2013 г. Германия предложила концепцию „Индустрии 4.0“, ключевой идеей которой является „киберфизическая система“ (cyber-physical system — CPS). CPS — это многомерная комплексная система, интегрированная с вычислительной техникой, связью, управлением, сетью и физической средой [10]. CPS объединяет людей, машины и вещи, обеспечивая непрерывный обмен информацией с целью мониторинга, сбора данных, анализа и оптимизации производственных процессов. Для реализации подобных процессов необходимо использование цифровых двойников.

Однако подробное описание цифрового двойника М. Гривс представил лишь в 2014 г., оформив свои размышления в виде так называемой „белой книги“ („white paper“) [4], адресованной корпоративному сообществу, в которой описывается новая технология и дается общее понимание предмета. Часть крупных промышленных компаний (например, „Siemens“) практически сразу приняли данную терминологию и начали использовать термин „цифровой двойник“ в своих маркетинговых материалах.

Основные этапы развития концепции цифровых двойников можно проследить на рис. 2.



Рис. 2

В настоящее время мы способны собирать куда больше данных, чем это было возможно в 2003 г. Сейчас в автоматическом режиме можно получать информацию с датчиков, расположенных на станках, конвейерах, измерительных машинах и т.д. Этим и объясняется повышенный интерес к цифровым двойникам, который наблюдается в последние годы. Судя по числу публикаций, рост заинтересованности исследователей в данной теме начался с 2015 г. [11], что наглядно иллюстрирует график, представленный на рис. 3 (по оси ординат N — количество публикаций).

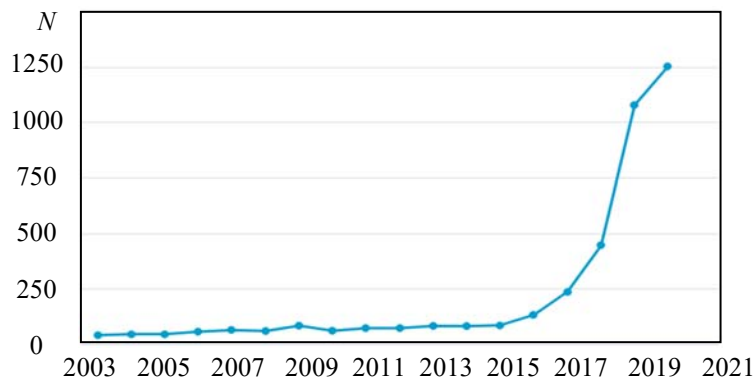


Рис. 3

Определение понятия „цифровой двойник“. В научной литературе встречаются самые разные толкования данного термина. М. Гривс определяет цифровой двойник как *„набор виртуальных информационных конструкций, которые полностью описывают потенциальный или фактически произведенный физический продукт от микроатомного до макрогеометрического уровня“* [3].

Представители NASA подчеркивают, что *„цифровой двойник — это интегрированная мультифизическая, мультимасштабная, вероятностная симуляция транспортного средства или системы, которая использует лучшие доступные физические модели, обновления датчиков, историю эксплуатации...“* [12].

В работе [13] уточняется, что цифровой двойник представляет собой *„должным образом синхронизированную совокупность полезной информации ... о физическом объекте в виртуальном пространстве, с потоками информации, обеспечивающими конвергенцию между физическим и виртуальным состояниями“*. Дополнение к этому определению приведено в [14], где подчеркивается, что цифровой двойник функционирует *„в течение всего жизненного цикла с использованием данных в режиме реального времени“*. В [15] цифровые двойники рассматриваются как *„цифровые репродукции как живых, так и неживых сущностей..., которые облегчают оптимизацию функций всех физических объектов и обеспечивают постоянную обратную связь для улучшения качества жизни и благосостояния человека“*. В [16] подчеркивается важность использования *„физических данных, виртуальных данных и данных взаимодействия между ними“*.

Несмотря на то, что за прошедшие годы концепция цифровых двойников значительно „повзрослела“ и появилось большое количество исследований на данную тему, следует отметить, что большинство авторов в своих работах все еще оперируют общими абстрактными понятиями, избегая конкретики. Данный подход порождает множество однообразных публикаций, содержащих незначительное количество новой информации, что затрудняет поиск действительно полезных исследований, которые могли бы ускорить массовое внедрение данной концепции на практике.

В работах [17, 18] представлено более конкретное определение, которое приближает нас к пониманию практической реализации цифрового двойника: *„Цифровой двойник — это семейства сложных мультидисциплинарных математических моделей с высоким уровнем адекватности реальным материалам, реальным объектам / конструкциям / машинам / приборам ... / техническим и киберфизическим системам, физико-механическим процессам (включая технологические и производственные процессы), описываемых 3D нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных и обеспечивающих отличие между результатами виртуальных испытаний и натурных испытаний в пределах $\pm 5\%$ (DT-1), и / или „умная“ модель, учитывающая особенности конкретного производства и технологии изготовления (DT-2). Обязательным элементом разработки и применения цифровых двойников является многоуровневая матрица целевых показателей конкурентоспособного продукта / изделия и ресурсных ограничений (временных, финансовых, технологических, производственных, экологических и т. д.)“*. При этом под DT-1 понимается цифровой двойник реального объекта или продукта, а под DT-2 — цифровой двойник производственного процесса.

Исходя из приведенных выше определений можно сделать вывод, что реализация цифрового двойника начинается с многоуровневого моделирования реального объекта, процесса или системы с помощью вычислительной техники и специального программного обеспечения. При этом виртуальная модель должна с высокой точностью описывать геометрию, физические свойства, поведение и правила, характеризующие физический объект, процесс или систему.

Классификация цифровых двойников. Одну из первых классификаций цифровых двойников приводит М. Гривс. В работе [3] он указывает, что существует два вида цифровых двойников и вводит следующие понятия:

— *цифровой двойник-прототип* (Digital Twin Prototype — DTP) — полное определение физического объекта, достаточное для его создания, которое содержит: полностью аннотированные 3D-модели, спецификации, описание технологии производства и информацию по эксплуатации и обслуживанию;

— *цифровой двойник-экземпляр* (Digital Twin Instance — DTI) — цифровой двойник конкретного экземпляра продукта после его изготовления, с которым он остается связанным на протяжении всего жизненного цикла изделия; помимо информационных наборов, необходимых для DTP, в DTI содержится информация о сервисных операциях и испытаниях, а также геометрических допусках и параметрах конкретного изделия; эта информация, а также актуальные данные, поступающие с датчиков, накапливаются и могут использоваться для предсказания будущего поведения данного экземпляра.

При этом цифровые двойники функционируют в „окружении (среде) цифровых двойников“ (Digital Twin Environment — DTE) — интегрированном многодоменном прикладном пространстве для работы с цифровыми двойниками в различных целях. Такими целями могут быть:

— прогностическая: использование цифрового двойника для предсказания будущего поведения и производительности физического объекта;

— опросная: запрос прошлых данных за любой период функционирования изделия, запрос текущего состояния.

Классификация Гривса приводится во многих работах, посвященных цифровым двойникам. Однако, с практической точки зрения, более удобной представляется классификация, приведенная на рис. 4.

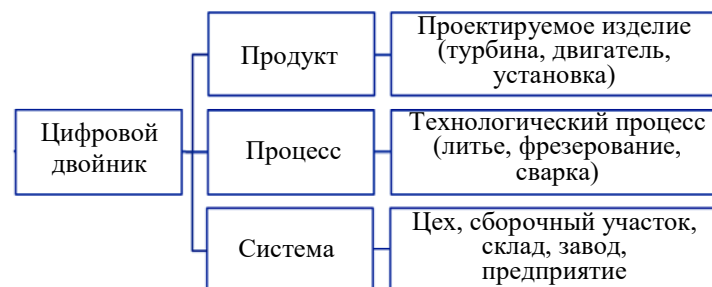


Рис. 4

Цифровой двойник продукта позволяет разрабатывать изделия, удовлетворяющие большому числу параметров и ограничений, проводить виртуальные испытания и вносить изменения в конструкцию без необходимости изготовления реальных прототипов. Данный подход позволяет учесть на стадии проектирования значительно большее число характеристик будущего изделия, чем это возможно при традиционном подходе к конструированию. При этом натурные испытания могут быть пройдены с первого раза, что значительно повышает экономическую эффективность процесса разработки уникальных и мелкосерийных изделий.

Авторы работы [19] изучили применение цифровых двойников при разработке продукции и предложили несколько теоретических подходов и инструментов для реализации продукт-ориентированных цифровых двойников. Работы по внедрению цифровых двойников своей продукции активно ведут такие компании, как КамАЗ, „Росатом“, „Вертолеты России“, УАЗ и другие представители российской промышленности [20].

На предприятии „ОДК Климов“ завершен первый этап проекта по разработке цифрового двойника двигателя ТВ7-117СТ-01, в рамках которого созданы виртуальные испытательные

стенды и полигон двигателя, интегрированные в экспертную систему. В будущем это позволит снизить массу отдельных деталей до 50 % [21].

Цифровой двойник процесса (см. рис. 4) моделирует реальные производственные процессы. Это позволяет отражать актуальное состояние оборудования, накапливать и обрабатывать данные, поступающие с датчиков, для предсказания дальнейшего состояния системы. Помимо наблюдательной и предиктивной функций, цифровой двойник позволяет моделировать различные режимы работы и различные конфигурации оборудования в целях оптимизации производства.

В [22] обсуждается, как адаптировать существующие инструменты, чтобы позволить цифровому двойнику и прикладному *vueOne* (набор виртуальных инженерных инструментов) оптимизировать процесс вставки магнитов. Использование цифрового двойника для обеспечения геометрических характеристик объекта в реальном времени на стадиях подготовки производства и самого производства рассматривается в [23] на примере сборочного участка для деталей из листового металла. В работах [24, 25] обсуждаются возможности использования цифрового двойника для мониторинга сложного производственного процесса, его своевременной корректировки и оптимизации.

Среди российских предприятий можно привести, например, компанию „Газпром нефть“, которая создала цифровой двойник процесса подъема жидкости из скважин. Он позволяет подбирать оптимальные режимы работы, заранее идентифицировать нештатные ситуации, вести превентивную оценку работы системы в случае изменения ее конфигурации. Также компания приступила к созданию цифрового двойника установки для гидроочистки бензина каталитического крекинга на Московском нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ) и установки для первичной переработки нефти на Омском НПЗ [26].

Под *цифровыми двойниками систем* (см. рис. 4) понимаются виртуальные модели, описывающие функционирование отдельных цехов или целых предприятий. В такие модели закладываются колоссальные объемы данных, которые позволяют имитировать поведение сложной системы в виртуальном мире и управлять элементами этой системы в мире физическом. При этом цифровой двойник может быть построен как для уже существующего предприятия в целях оптимизации его бизнес-процессов, так и для проектирования новых предприятий.

В [27] описывается основанный на цифровом двойнике подход к проектированию производственных линий на примере линии по производству полого стекла. Разработанный цифровой двойник цеха, который включает в себя физический цех, виртуальный цех, систему обслуживания цеха и производственные данные, представлен в работе [28]. В [29] описывается, как была разработана „цифровая фабрика“ — цифровой двойник физического завода, с точки зрения возможностей добычи, цепочки поставок и процесса цифровизации.

Подходы к построению цифровых двойников. Следует отметить, что цифровой двойник — это не какая-то отдельная технология, а совокупность, „агрегатор“ различных современных цифровых технологий, которые уже активно используются на промышленных предприятиях.

Отсутствие универсальных методик построения цифровых двойников, подробных отраслевых стандартов и типовых решений затрудняет внедрение технологии. Однако некоторые исследователи пытаются обобщить свой опыт в этом направлении и предлагают собственные подходы к процессу построения цифровых двойников. Различные методологии отражены в работах [30—34].

Более общий, но в то же время более системный подход описан в [35], где перечислены основные этапы построения цифрового двойника (рис. 5).



Рис. 5

Этап 1. Построение виртуального представления физического продукта. В качестве технологий для решения этой задачи предлагается использовать CAD-системы (Computer-Aided Design — системы автоматизированного проектирования) для трехмерного моделирования. Однако, ссылаясь на [36], авторы [35] указывают, что виртуальная модель должна состоять из трех уровней:

- уровень компонентов: геометрическая и физическая модели объекта;
- уровень поведения: анализ продукта и анализ взаимодействия с пользователем;
- уровень правил: оценки, оптимизация и прогностические модели, основанные на правилах взаимодействия с продуктом.

Новая модель цифрового двойника для управления трехмерной конфигурацией продукта предложена в [37], а модель для управления геометрическими вариациями — в [38]. Авторы утверждают, что цифровой двойник позволил дизайнерам оценить качество продукта даже на ранней стадии разработки.

Этап 2. Обработка данных для облегчения принятия решений по проектированию. На этом этапе данные, собранные из различных источников, подвергаются анализу, интеграции и визуализации для более наглядного представления. Так как цифровые двойники могут интегрировать различные данные (например, данные об окружающей среде, эксплуатационные данные и данные технологического процесса), автономные системы могут реагировать на изменения состояния даже во время текущей работы [39]. Абстрактные данные должны быть преобразованы в конкретные закономерности, которые могут быть использованы при проектировании. Причем эти закономерности могут быть и скрытыми: потребуется использовать технологии искусственного интеллекта (Artificial Intelligence — AI) для получения автоматических рекомендаций при проектировании.

Этап 3. Моделирование поведения продукта в виртуальной среде. Симуляция поведения продукта осуществляется с помощью технологий имитационного моделирования с последующей визуализацией в среде виртуальной реальности (Virtual Reality — VR). В [40] рассмотрена архитектура и приведен пример совместного использования технологий виртуальной реальности и цифрового двойника. Роль имитационных моделей в построении и эксплуатации цифровых двойников исследована в [41].

Этап 4. Управление физическим продуктом для реализации рекомендуемого поведения. Датчики и исполнительные механизмы являются технологической основой физической части цифрового двойника. Первые выполняют функцию по восприятию информации физического мира, тогда как вторые позволяют вносить желаемые корректировки, запрошенные цифровым двойником, в объекты физического мира. Кроме того, технологии дополненной реальности (Augmented Reality — AR) могут быть использованы для отображения некоторых частей виртуального продукта в физическом мире. Например, AR позволяет конечным пользователям просматривать состояние отдельных параметров продуктов в реальном времени.

Этап 5. Установка двустороннего и безопасного соединения между физическим и виртуальными продуктами в режиме реального времени. Для решения этой задачи необходимо прибегнуть к облачным вычислениям и хранению данных на удаленных серверах. При этом следует уделить внимание безопасности применяемых решений. К возможным сетевым технологиям можно отнести, например, Bluetooth, QR-коды, штрих-коды, Wi-Fi, ZigBee, Z-Wave и др. Доступ к виртуальному продукту и данным должен быть одинаково удобен как для проектировщиков, так и для конечных удаленных пользователей, что невозможно реализовать без использования облачных технологий с высоким уровнем безопасности соединений.

Этап 6. Сбор данных, связанных с продукцией, из различных источников. Следует выделить данные о продукте (комментарии клиентов, записи о просмотре и загрузке), данные об окружающей среде, интерактивные данные о взаимодействии пользователь — продукт — среда, например, о нагрузках, вибрациях и т.п. Собранные данные отправляются на *первый этап* для внесения изменений в виртуальный продукт с целью его дальнейшего улучшения. Как можно видеть, система образует замкнутый цикл с обратной связью. Свой подход к сбору данных для внедрения цифрового двойника в производственные системы представлен в [42].

В [43] представлена „5-мерная модель цифрового двойника“ (five-dimension digital twin model), в которой проблема рассматривается под несколько иным углом, модель описывается формулой

$$M_{DT} = (PE, VM, Ss, DD, CN),$$

где PE — физические объекты, VM — виртуальные модели, Ss — сервисы, DD — данные цифрового двойника, CN — протоколы взаимодействия.

Несомненно, можно найти и общие элементы с решением, представленным в [35], но данная модель более полно описывает составляющие цифрового двойника и выделяет различные категории инструментов, которые необходимо использовать при его построении (рис. 6).



Рис. 6

1) *Инструменты для взаимодействия с физическим миром.* Распознавание различных аспектов физического мира является основой цифровизации. Когда физические объекты подключены к системам обнаружения и сбора данных, цифровой двойник превращает данные в информацию и, в конечном счете, в оптимизированные процессы и экономические результаты. К этой категории инструментов относят датчики и сенсоры (идентификация, измерение), а также приводы и исполнительные механизмы, которые способны вносить изменения в физический мир — подстраивать и регулировать работу реальных объектов. Цифровой двойник рассматривается как новый способ управления промышленным Интернетом вещей (Industrial Internet of Things — IIoT) [44].

2) *Инструменты для моделирования.* Моделирование — ключевой этап построения цифрового двойника. В рассматриваемой модели в данную категорию включены этапы 1 и 3 из подхода, описанного в [35]. Это можно объяснить развитием систем моделирования и интеграции CAD/CAE. Для достижения тесной интеграции между виртуальным и физическим пространствами и усовершенствования технологии моделирования авторы работы [45] представили EDT (Experimentable Digital Twin — „испытательный цифровой двойник“).

3) *Инструменты для построения сервисов и приложений.* Поскольку цифровой двойник содержит в себе функции мониторинга, моделирования, диагностики и предиктивного анализа системы и ее будущих состояний, для удобства взаимодействия с ним часть процессов может быть преобразована в web-сервисы — приложения, доступные с различных устройств посредством Интернет-соединения. При этом для более наглядного представления данных цифрового двойника внутри сервисов потребуются инструменты для построения компьютерной графики, обработки изображений и визуализации, а также технологии синхронизации с системами виртуальной и дополненной реальности и т.д. С учетом современных реалий доступ к цифровому двойнику должен быть одинаково удобен как с мобильных, так и со стационарных устройств.

4) *Инструменты для работы с данными.* Жизненный цикл данных включает в себя сбор, хранение, слияние, передачу, обработку и визуализацию. Источниками данных являются аппаратное и программное обеспечение цифрового двойника, а также сеть. Ключевая проблема — смешение разнородных форматов данных, поступающих из разных источников, так как каждое программное обеспечение, как правило, производит и хранит данные в некоем закрытом формате.

Одним из решений является использование облачных сервисов, преимущества и недостатки данного подхода описаны в [46]. Также перспективное направление в области управления данными цифрового двойника — использование технологии блок-чейн (blockchain). В [47] авторы предлагают новаторский подход к решению задачи управления данными цифрового двойника в рамках жизненного цикла продукта; рассматриваются вопросы хранения данных, доступа к ним, совместного использования, достоверности данных и их перезаписи.

5) *Протоколы взаимодействия.* Для достижения результата различные части цифрового двойника должны иметь возможность взаимодействия в реальном времени. Поэтому следует уделить особое внимание проектированию интерфейсов, выбору протоколов, формату передачи и хранения данных, сценариям взаимодействия физического и виртуального миров. Универсальные протоколы, по которым происходит обмен данными внутри цифрового двойника, еще только предстоит создать, так как существующие на текущий момент разработки не всегда отвечают современным запросам и, как правило, предназначены для решения очень узких, специфических задач.

Представленная 5-мерная модель показывает, насколько сложной является задача построения цифрового двойника. Для каждого из пяти направлений необходимо выбрать конкретные решения, воплотить их в жизнь и, самое главное, обеспечить взаимодействие различных элементов внутри этой сложной системы.

Заключение. На основе представленного обзора можно сделать вывод, что за прошедшие годы концепция цифровых двойников из абстрактной идеи превратилась во вполне зрелую технологию, которая находит все более широкое применение в самых разных областях промышленности [11, 43]. Эффективность применения цифровых двойников доказана мировыми лидерами. Например, компания „General Electric“ (GE, США) активно внедряет цифровые двойники ветряных электростанций и владеет патентами, тематика которых связана с цифровыми двойниками [48]. Компанией доказано, что цифровой двойник может изменить парадигму развития, эксплуатации и обслуживания ветряных электрогенераторов. По сравнению с традиционным подходом использование цифрового двойника может повысить годовую выработку электроэнергии ветряков на 16 % [49]. Компанией „Siemens“ (Германия) разработан цифровой двойник для планирования, эксплуатации и обслуживания энергетической системы Финляндии, что значительно улучшило уровень автоматизации системы и положительно повлияло на качество использования данных и принятие решений [50].

Среди преимуществ, обусловленных внедрением цифровых двойников, можно отметить следующие:

- новый уровень контроля и прозрачности производственных процессов;
- сокращение затрат на ремонт, уменьшение простоя за счет предиктивной аналитики состояния оборудования;
- симуляция изменений и проверка гипотез „а что если?“ в виртуальной среде без необходимости реальных изменений в физическом мире, что позволяет сократить затраты на оптимизацию и снизить риски;
- повышение качества выпускаемой продукции за счет изменения подхода к производству (матрица из тысяч целевых показателей может быть заложена на этапе разработки) и постоянной оптимизации на основе анализа данных;
- следующий уровень приближения к полному контролю над производством с помощью цифровых технологий и к созданию полностью автономных производств.

Однако существуют и риски, возникающие при пилотном внедрении данной концепции:

- недостаточный уровень автоматизации производств;
- необходимость покрытия территории предприятия высококачественными беспроводными сетями для полномасштабного функционирования IIoT;
- сложность объединения, анализа и обработки разнородных данных, поступающих из большого количества различных источников;
- долгосрочный возврат инвестиций, что затрудняет принятие решений об использовании технологии ввиду неочевидности экономических эффектов на ранних стадиях внедрения;
- необходимость владения большим набором математических и IT-компетенций, таких как: математическое моделирование процессов и систем, машинное обучение, искусственный интеллект, работа с большими данными, анализ данных и др.; зачастую это означает необходимость привлечения внешних исполнителей, которым нужно предоставить высокий уровень доступа к процессам, оборудованию и технологиям предприятия.

Несмотря на большое количество исследований и публикаций на данную тему, для отдельно взятой компании построение и внедрение цифрового двойника по-прежнему является сложным и длительным процессом. Дискуссии среди представителей промышленности и исследователей продолжаются [51], однако первые шаги в области государственной стандартизации цифровых двойников в Российской Федерации уже отражены в документе ПНСТ 429-2020, который является предварительным национальным стандартом (дата введения в действие 01.01.2021). Стандарт кратко описывает общие положения и основополагающие принципы цифровых двойников.

Тем не менее необходимость разработки новых инструментов, универсальной структурной модели и унифицированной методики построения цифрового двойника все еще остается критически важным направлением для дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mittal S., Khan M. A., Romero D., Wuest T.* Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2019. Vol. 233(5). P. 1342—1361. DOI:10.1177/0954405417736547.
2. *Garfinkel J.* Gartner Identifies the Top 10 Strategic Technology Trends for 2019 // Gartner Tech. Rep. 2018, Oct.
3. *Grieves M., Vickers J.* Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // *Kahlen F. J., Flumerfelt S., Alves A.* (Eds). Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham: Springer, 2017. P. 85-113. DOI:10.1007/978-3-319-38756-7_4.
4. *Grieves M.* Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication: White Paper [Электронный ресурс]: <https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication>.
5. *Grieves M.* Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises // International Journal of Product Development. 2005. Vol. 2(1/2). P. 71—84.
6. *Grieves M.* Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking. N.Y.: McGraw-Hill, 2006.
7. *Grieves M.* Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products Through Product Lifecycle Management. Cocoa Beach, FL, USA: Space Coast Press, 2011.
8. *Tuegel E. J., Ingraffea A. R., Eason T. G.* et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin // Intern. Journal of Aerospace Engineering. 2011. Vol. 2011. [Электронный ресурс]: <<http://dx.doi.org/10.1155/2011/154798>>.
9. *Shafto M., Conroy M., Doyle R.* et al. Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap. Washington, DC, USA: NASA, 2012.
10. *Lee J., Bagheri B., Kao H. A.* A Cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems // Manufacturing Letters. 2015. Vol. 3. P. 18—23.
11. *Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.* Digital twin in industry: State-of-the-art // IEEE Trans. on Industrial Informatics. 2019. Vol. 15. P. 2405—2415.
12. *Glaessgen E., Stargel D.* The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf., Honolulu, Hi. 2012. Apr.
13. *Hicks B.* Industry 4.0 and Digital Twins: Key lessons from NASA [Электронный ресурс]: <<https://www.thefuturefactory.com/blog/24>>, 30.11.2020.
14. *Bolton R. N.* et al. Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms // J. of Service Management. 2018. Vol. 29, N 5. P. 776—808.
15. *Abdulmoteleb El Saddik A.* Digital twins: the convergence of multimedia technologies // IEEE Multimedia. 2018. Vol. 25, N 2. P. 87—92.
16. *Tao F.* et al. Digital twin-driven product de-sign framework // Intern. Journal of Production Research. 2018. P. 1—19.
17. Дорожная карта развития „сквозной“ цифровой технологии „Новые производственные технологии“ [Электронный ресурс]: <<https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019npt.pdf>>, 30.11.2020.
18. *Боровков А. И., Рябов Ю. А.* Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки // Цифровая трансформация экономики и промышленности: Сб. тр. науч.-практ. конф. с зарубежным участием, 20—22 июня 2019 г. СПб: Политех-Пресс, 2019. С. 234—245. DOI:10.18720/IEP/2019.3/25.
19. *Zhuang C. B., Liu J. H., Xiong H., Ding X. Y., Liu S. L., Weng G.* Connotation, architecture and trends of product digital twin // Computer Integrated Manufacturing Systems. 2017. Vol. 23, N 4. P. 53—768. DOI: 10.13196/j.cims.2017.04.010.

20. Полный „Кортеж“: по уникальной технологии создадут одежду и самолеты [Электронный ресурс]: <<https://iz.ru/775351/nataliia-mikhailchenko/polnyi-kortezh-po-unikalnoi-tekhnologii-sozdatut-odezhdu-i-samolety>>, 30.11.2020.
21. „Цифровой двойник“ помогает снизить массу двигателя [Электронный ресурс]: <https://klimov.ru/media/news/?ELEMENT_ID=902>, 30.11.2020.
22. *Konstantinov S., Ahmad M., Ananthanarayan K., Harrison R.* The cyber-physical e-machine manufacturing system: Virtual engineering for complete lifecycle support // *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 63. P. 119—124. DOI:10.1016/j.procir.2017.02.035.
23. *Soderberg R., Wärmefjord K., Carlson J. S., Lindkvist L.* Toward a digital twin for real-time geometry assurance in individualized production // *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 2017. Vol. 66, N 1. P. 137—140. DOI:10.1016/j.cirp.2017.04.038.
24. *Weyer S., Meyer T., Ohmer M., Gorecky D., Zühlke D.* Future modeling and simulation of CPS-based factories: An example from the automotive industry // *IFAC PapersOnLine*. 2016. Vol. 49, N 31. P. 97—102. DOI:10.1016/j.ifacol.2016.12.168.
25. *Vachalek J., Bartalský L., Rovný O., Šišmišová D., Morháč M., Lokš'ík M.* The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept // *Proc. of the 21st Intern. Conf. Process Control, Štrbské Pleso, Slovakia*. 2017. P. 258—262. DOI:10.1109/PC.2017.7976223.
26. Цифровое зеркало [Электронный ресурс]: <<https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2018-september-projects/1863687/>>, 30.11.2020.
27. *Zhang H., Liu Q., Chen X., Zhang D., Leng J.* A digital twin-based approach for designing and multi-objective optimization of hollow glass production line // *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. P. 26901—26911. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2766453.
28. *Tao F., Zhang M.* Digital twin shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing // *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. P. 20418—20427. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2756069.
29. *Ameri F., Sabbagh R.* Digital factories for capability modeling and visualization // *Proc. IFIP Intern. Conf. Adv. Prod. Manage. Syst., Iguassu Falls, Brazil*. 2016. P. 69—78.
30. *Schroeder G. et al.* Visualising the digital twin using web services and augmented reality // *Proc. 14th IEEE Intern. Conf. Ind. Informat., Poitiers, France*. 2016. P. 522—527. DOI:10.1109/INDIN.2016.7819217.
31. *Schroeder G., Steinmetz C., Pereira C. E., Espindola D. B.* Digital twin data modeling with automation ML and a communication methodology for data exchange // *IFAC PapersOnLine*. 2016. Vol. 49, N 30. P. 12—17. DOI:10.1016/j.ifacol.2016.11.115.
32. *Yun S., Park J. H., Kim W. T.* Data-centric middleware based digital twin platform for dependable cyber-physical systems // *Proc. of the 9th Intern. Conf. Ubiquitous Future Netw., Milan, Italy*. 2017. P. 922—926.
33. *Haag S., Anderl R.* Digital twin-proof of concept // *Manufacturing Letters*. 2018. Vol. 15. P. 64—66. DOI:10.1016/j.mfglet.2018.02.006.
34. *DebRoy T., Zhang W., Turner J., Babu S. S.* Building digital twins of 3D printing machines // *Scripta Mater*. 2017. Vol. 135. P. 119—124. DOI:10.1016/j.scriptamat.2016.12.005.
35. *Tao F., Sui F., Liu A., Qi Q., Zhang M., Song B., Guo Z., Lu S. C.-Y., Nee A. Y. C.* Digital twin-driven product design framework // *Intern. Journal of Production Research*. 2019. Vol. 57:12. P. 3935—3953. DOI:10.1080/00207543.2018.1443229.
36. *Tao F., Zhang M., Cheng J., Qi Q.* Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop // *Computer Integrated Manufacturing Systems*. 2017. Vol. 23. P. 1—9. DOI:10.13196/j.cims.2017.01.001.
37. *Yu Y., Fan S. T., Peng G. Y., Dai S., Zhao G.* Study on application of digital twin model in product configuration management // *Aeronaut. Manuf. Technol.* 2017. Vol. 526, N 77. P. 41—45. DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.07.041.
38. *Schleich B., Anwer N., Mathieu L., Wartzak S.* Shaping the digital twin for design and production engineering // *CIRP Ann. Manuf. Tech.* 2017. Vol. 66, N 1. P. 141—144. DOI:10.1016/j.cirp.2017.04.040.
39. *Rosen R., Wichert G. V., Lo G., Bettenhausen K. D.* About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing // *IFAC PapersOnLine*. 2015. Vol. 48, N 3. P. 567—572. DOI:10.1016/j.ifacol.2015.06.141.

40. *Havard V., Jeanne B., Lacomblez M., Baudry D.* Digital twin and virtual reality: a co-simulation environment for design and assessment of industrial workstations // *Production & Manufacturing Research*. 2019. Vol. 7:1. P. 472—489. DOI: 10.1080/21693277.2019.1660283.
41. *Петров А. В.* Имитация как основа технологии цифровых двойников // *Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та*. 2018. № 10 (141). С. 56—66. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-56-66.
42. *Uhlemann T. H. J., Lehmann C., Steinhilper R.* The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0 // *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 61. P. 335—340. DOI:10.1016/j.procir.2016.11.152.
43. *Qi Q., Tao F., Hu T., Anwer N., Liu A., Wei Y., Wang L., Nee A.* Enabling technologies and tools for digital twin // *J. of Manufacturing Systems*. 2019. DOI:10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
44. *Canedo A.* Industrial IoT lifecycle via digital twins // *Proc. of the 11th IEEE/ACM/IFIP Intern. Conf. Hardware/Softw. Codes. Syst. Synthesis, Pittsburgh, PA, USA*. 2016.
45. *Schluse M., Priggemeyer M., Atorf L., Rossmann J.* Experimentable digital twins—Streamlining simulation-based systems engineering for Industry 4.0 // *IEEE Trans. Ind. Information*. 2018. Vol. 14, N 4. P. 1722—1731. DOI:10.1109/TII.2018.2804917.
46. *Dasbach T., Zancul E., Schützer K., Anderl R.* Digital Twin – Integrating Cloud Services into Communication Protocols // *Fortin C., Rivest L., Bernard A., Bouras A.* (Eds). *Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era: PLM 2019. IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Cham: Springer, 2019. Vol. 565. P. 283—292. DOI:10.1007/978-3-030-42250-9_27.
47. *Sihan H., Guoxin W., Yan Y., Xiongbing F.* Blockchain-based data management for digital twin of product // *J. of Manufacturing Systems*. 2020. Vol. 54. P. 361—371. DOI:10.1016/j.jmsy.2020.01.009.
48. Digital Wind Farm System / *A. M. Lund et al.* U.S. Patent Application N 15/075 231. 2016.
49. GE Renewable Energy, Digital Wind Farm—the Next Evolution of Wind Energy [Электронный ресурс]: <<https://www.ge.com/renewableenergy/sites/default/files/2020-01/digital-wind-farm-solutions-gea31821b-r2.pdf>>, 30.11.2020.
50. How do you know where to invest in your power grid? [Электронный ресурс]: <<https://new.siemens.com/global/en/company/stories/infrastructure/2018/digital-twin-fingrid.html>>, 30.11.2020.
51. *Васильева Е.* Компоненты Индустрии 4.0: Цифровые двойники // *Автоматизация проектирования*. 2019. № 3. С. 22—38.

Сведения об авторах**Михаил Вячеславович Царев**— аспирант; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; E-mail: tsarev@tsarevstudio.ru**Юрий Сергеевич Андреев**— канд. техн. наук; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; E-mail: ysandreev@itmo.ruПоступила в редакцию
16.02.2021 г.

Ссылка для цитирования: Царев М. В., Андреев Ю. С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2021. Т. 64, № 7. С. 517—531.

**DIGITAL TWINS IN INDUSTRY:
DEVELOPMENT HISTORY, CLASSIFICATION, TECHNOLOGIES, USE CASES****M. V. Tsarev, Yu. S. Andreev***ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: tsarev@tsarevstudio.ru*

The presented review of scientific literature on the topic "Digital twins in industry" is based on publications by foreign and domestic researchers. The processes of the concept development starting from the moment of its appearance to the present, are considered. Due to the ambiguity of the term "Digital Twin" interpretation, several definitions of this concept are formulated, and a brief analysis of them is given.

Classification of digital twins, as well as approaches to their construction and technologies used are reflected. Scenarios of digital twins application are considered on examples from the experience of Russian and foreign companies. Conclusions are given on the prospects for development in the research area, the advantages and risks of introducing digital twins at industrial enterprises are analyzed.

Keywords: digital twin, modeling, digital twin classification, industry, technologies, IIoT, smart manufacturing, use cases

REFERENCES

- Mittal S., Khan M.A., Romero D., Wuest T. *Journal of Engineering Manufacture*, 2019, no. 5(233), pp. 1342–1361, DOI:10.1177/0954405417736547.
- Garfinkel J. *Gartner Identifies the Top 10 Strategic Technology Trends for 2019*, Gartner, Tech. Rep., October 2018.
- Grieves M., Vickers J. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Cham, Springer, 2017, pp. 85–113, DOI:10.1007/978-3-319-38756-7_4.
- Grieves M. *White Paper*, https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication.
- Grieves M. *Intern. Journal of Product Development*, 2005, no. 2(1/2), pp. 71–84.
- Grieves M. *Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking*, NY, USA, McGraw-Hill, 2006.
- Grieves M. *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products Through Product Lifecycle Management*, Cocoa Beach, FL, USA, Space Coast Press, 2011.
- Tuegel E.J., Ingraffea A.R., Eason T.G. et al. *Intern. Journal of Aerospace Engineering*, 2011, vol. 14, DOI:154798. <http://dx.doi.org/10.1155/2011/154798>.
- Shafto M., Conroy M., Doyle R. et al. *Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap*, Washington, DC, USA, NASA. 2012.
- Lee J., Bagheri B., Kao H.A. *Manufacturing Letters*, 2015, vol. 3, January, pp. 18–23.
- Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, vol. 15, pp. 2405–2415.
- Glaessgen E., Stargel D. *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conf. 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conf. 14th AIAA*, 2012, pp. 1818.
- Hicks B. *Industry 4.0 and Digital Twins: Key lessons from NASA*, <https://www.thefuturefactory.com/blog/24>.
- Bolton R. N. et al. *Journal of Service Management*, 2018, no. 5(29), pp. 776–808.
- Abdulmotaleb El Saddik A. *IEEE Multimedia*, 2018, no. 2(25), pp. 87–92.
- Tao F. et al. *Intern. Journal of Production Research*, 2018, pp. 1–19.
- <https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019npt.pdf>. (in Russ.)
- Borovkov A.I., Ryabov Yu.A. *Tsifrovaya transformatsiya ekonomiki i promyshlennosti* (Digital Transformation of the Economy and Industry), Proc. of a Sci. and Pract. Conf. with Foreign Participation, St. Petersburg, June 20–22, pp. 234–245, DOI:10.18720/IEP/2019.3/25.
- Zhuang C.B., Liu J.H., Xiong H., Ding X.Y., Liu S.L., Weng G. *Comput. Integr. Manuf. Syst.*, 2017, no. 4(23), pp. 53–768, DOI:10.13196/j.cims.2017.04.010.
- <https://iz.ru/775351/nataliia-mikhhalchenko/polnyi-kortezh-po-unikalnoi-tekhnologii-sozhdadut-odezhdu-i-samolety>. (in Russ.)
- https://klimov.ru/media/news/?ELEMENT_ID=902. (in Russ.)
- Konstantinov S., Ahmad M., Ananthanarayan K., Harrison R. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 63, pp. 119–124, DOI:10.1016/j.procir.2017.02.035.
- Soderberg R., Warmefjord K., Carlson J. S., Lindkvist L. *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, 2017, no. 1(66), pp. 137–140, DOI:10.1016/j.cirp.2017.04.038.
- Weyer S., Meyer T., Ohmer M., Gorecky D., Zuhlke D. *IFAC PapersOnLine*, 2016, no. 31(49), pp. 97–102, DOI:10.1016/j.ifacol.2016.12.168.
- Vachalek J., Bartalský L., Rovný O., Šišmišová D., Morháč M., Lokšík M. *Proc. 21st Intern. Conf. Process Control*, Štrbské Pleso, Slovakia, 2017, pp. 258–262. DOI:10.1109/PC.2017.7976223.
- <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2018-september-projects/1863687/>. (in Russ.)
- Zhang H., Liu Q., Chen X., Zhang D., Leng J. *IEEE Access*, 2017, vol. 5, pp. 26901–26911, DOI:10.1109/ACCESS.2017.2766453.
- Tao F., Zhang M. *IEEE Access*, 2017, vol. 5, pp. 20418–20427, DOI:10.1109/ACCESS.2017.2756069.
- Ameri F., Sabbagh R. *Proc. IFIP Intern. Conf. Adv. Prod. Manage. Syst.*, Iguassu Falls, Brazil, 2016, pp. 69–78.
- Schroeder G. et al. *IEEE 14th Intern. Conf. Ind. Informat.*, Poitiers, France, 2016, pp. 522–527, DOI:10.1109/INDIN.2016.7819217.
- Schroeder G., Steinmetz C., Pereira C.E., Espindola D.B. *IFAC PapersOnLine*, 2016, no. 30(49), pp. 12–17, DOI:10.1016/j.ifacol.2016.11.115.
- Yun S., Park J.H., Kim W.T. *Proc. 9th Intern. Conf. Ubiquitous Future Netw.*, Milan, Italy, 2017, pp. 922–926.

33. Haag S., Anderl R. *Manuf. Lett.*, 2018, vol. 15, pp. 64–66, DOI:10.1016/j.mfglet.2018.02.006
34. DebRoy T., Zhang W., Turner J., Babu S.S. *Scripta Mater.*, 2017, vol. 135, pp. 119–124, DOI:10.1016/j.scriptamat.2016.12.005.
35. Tao F., Sui F., Liu A., Qi Q., Zhang M., Song B., Guo Z., Lu S. C.-Y., Nee A.Y.C. *Intern. Journal of Production Research*, 2019, no. 12(57), pp. 3935–3953, DOI:10.1080/00207543.2018.1443229.
36. Tao F., Zhang M., Cheng J., Qi Q. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, vol. 23, pp. 1–9, DOI:10.13196/j.cims.2017.01.001
37. Yu Y., Fan S. T., Peng G. Y., Dai S., Zhao G. *Aeronaut. Manuf. Technol.*, 2017, no. 77(526), pp. 41–45, DOI:0.16080/j.issn1671-833x.2017.07.041.
38. Schleich B., Anwer N., Mathieu L., Wartzack S. *CIRP Ann. Manuf. Tech.*, 2017, no. 1(66), pp. 141–144, DOI:10.1016/j.cirp.2017.04.040.
39. Rosen R., Wichert G.V., Lo G., Bettenhausen K.D. *IFAC PapersOnLine*, 2015, no. 3(48), pp. 567–572, DOI:10.1016/j.ifacol.2015.06.141.
40. Havard V., Jeanne B., Lacomblez M., Baudry D. *Production & Manufacturing Research*, 2019, no. 1(7), pp. 472–489, DOI: 10.1080/21693277.2019.1660283.
41. Petrov A.V. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2018, no. 10(141), pp. 56–66, DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-56-66.
42. Uhlemann T.H.J., Lehmann C., Steinhilper R. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 61, pp. 335–340, DOI:10.1016/j.procir.2016.11.152.
43. Qi Q., Tao F., Hu T., Anwer N., Liu A., Wei Y., Wang L., Nee A. *Journal of Manufacturing Systems*, 2019, DOI:10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
44. Canedo A. *Proc. 11th IEEE/ACM/IFIP Intern. Conf. Hardware/Softw. Codes. Syst. Synthesis*, Pittsburgh, PA, USA, 2016, art. no. 29.
45. Schluse M., Priggemeyer M., Atorf L., Rossmann J. *IEEE Trans. Ind. Informat.*, 2018, no. 4(14), pp. 1722–1731, DOI:10.1109/TII.2018.2804917.
46. Dasbach T., Zancul E., Schützer K., Anderl R. *Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era. PLM 2019. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Cham, Springer, 2019, vol. 565, pp. 283–292, DOI:10.1007/978-3-030-42250-9_27.
47. Sihan H., Guoxin W., Yan Y., Xiongbing F. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020, vol. 54, pp. 361–371, DOI:10.1016/j.jmsy.2020.01.009.
48. Patent Application US 15/075 231, *Digital wind farm system*, A.M. Lund et al., 2016.
49. *GE Renewable Energy, Digital wind farm – the next evolution of wind energy*, <https://www.ge.com/renewableenergy/sites/default/files/2020-01/digital-wind-farm-solutions-gea31821b-r2.pdf>.
50. *How do you know where to invest in your power grid?* <https://new.siemens.com/global/en/company/stories/infrastructure/2018/digital-twin-fingrid.html>.
51. Vasil'yeva E. *Avtomatizatsiya proyektirovaniya*, 2019, no. 3, pp. 22–38. (in Russ.)

Data on authors

- Mikhail V. Tsarev** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: tsarev@tsarevstudio.ru
- Yuriy S. Andreev** — Ph.D., ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: ysandreev@itmo.ru

For citation: Tsarev M. V., Andreev Yu. S. Digital twins in industry: development history, classification, technologies, use cases. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 7. P. 517–531 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531