

УДК 004.031.4 004.032.2

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827

ПРИМЕНЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

В.Н. Шведенко^a, А.Е. Мозохин^{b,c}

^a Всероссийский институт научной и технической информации (ВИНИТИ РАН), Москва, 125190, Российская Федерация

^b Филиал ПАО «МРСК Центра» — «Костромаэнерго», Кострома, 156961, Российская Федерация

^c Костромской государственный университет, Кострома, 156005, Российская Федерация

Адрес для переписки: mozokhin@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 06.09.20, принята к печати 29.10.20

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Шведенко В.Н., Мозохин А.Е. Применение концепции цифровых двойников на этапах жизненного цикла производственных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 6. С. 815–827. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827

Аннотация

Предмет исследования. Представлен анализ современной концепции цифровых двойников применительно к производственным системам. Приведен обзор характеристик и параметров цифрового двойника, создающих преимущества применения данной концепции для производственных систем на этапах их жизненного цикла. Предложены варианты технической реализации концепции цифровых двойников для совершенствования технологических процессов производственных систем на следующих этапах жизненного цикла: идея, проект, реализация, эксплуатация, утилизация. **Метод.** Приведен ретроспективный анализ научных трудов, посвященных методологии и практическому применению программно-ориентированных подходов к проектированию, реализации и эксплуатации производственных систем Индустрии 4.0. Дана экспертная оценка и выполнен анализ применимости концепции цифровых двойников на этапах жизненного цикла производственных систем. **Основные результаты.** На основе анализа зарубежных исследований за последние десять лет определены и сгруппированы по значимости основные характеристики цифрового двойника, влияющие на эффективность применения концепции в производственных системах. Сформулированы преимущества и недостатки использования программно-ориентированного подхода к проектированию, реализации и эксплуатации производственных систем. **Практическая значимость.** Определены характеристики цифрового двойника, влияющие на эффективность его использования на этапах жизненного цикла производственных систем. Предложены варианты технической реализации современной концепции цифровых двойников для производственных систем с применением перспективных цифровых технологий и интеллектуальных электронных устройств. Систематизированы требования к функциональности, производительности, точности соответствия состояния виртуальной и физической среды, а также качественным характеристикам цифрового двойника, что позволит проводить оценку применимости цифровых двойников для решения существующих задач контроля и управления в производственных системах.

Ключевые слова

цифровой двойник, цифровая среда проектирования, применение цифровых двойников, жизненный цикл продукта, киберфизические системы

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827

CONCEPT OF DIGITAL TWINS AT LIFE CYCLE STAGES OF PRODUCTION SYSTEMS

V.N. Shvedenko^a, A.E. Mozokhin^{b,c}

^a All-Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI RAS), Moscow, 125190, Russian Federation

^b Branch of Kostromaenergo Rosseti Centre, Kostroma, 156961, Russian Federation

^c Kostroma State University, Kostroma, 156005, Russian Federation

Corresponding author: mozokhin@mail.ru

Article info

Received 06.09.20, accepted 29.10.20

Article in Russian

For citation: Shvedenko V.N., Mozokhin A.E. Concept of digital twins at life cycle stages of production systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 6, pp. 815–827 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827

Abstract

Subject of Research. The paper analyzes the current concept of digital twins in relation to production systems. The review is given for characteristics and parameters of the digital twin that create advantages of using this concept for production systems at their life cycle stages. Technical implementation variants for the concept of digital twins are proposed aimed at improvement of the technological processes of production systems at the following stages of the life cycle: an idea, project, realization, operation, and disposal. **Method.** We performed a retrospective analysis of scientific papers on the methodology and practical application of software-based approaches to the design, implementation and operation of industrial systems in Industry 4.0. An expert assessment and applicability analysis of the digital twins at the stages of the life cycle of production systems are given. **Main Results.** The main characteristics of the digital twin affecting the effectiveness of the concept application in production systems are determined and arranged into groups according to their importance based on the analysis of the foreign studies over the past 10 years. The advantages and disadvantages of a software-oriented approach application to the design, implementation and operation of production systems are formulated. **Practical Relevance.** The digital twin characteristics are determined that affect the efficiency of its usage at the life cycle stages of production systems. Variants of the modern concept technical implementation of digital twins for production systems are proposed by applying of advanced digital technologies and intelligent electronic devices. Requirements are systematized concerning functionality, performance, correspondence accuracy of the virtual and physical environment state, as well as the qualitative characteristics of the digital twin. They provide for the assessment about the applicability of digital twins for solving existing problems of control and management in production systems.

Keywords

digital twin, digital environment design, digital twin application, product life cycle, cyber-physical systems

Введение

Современными тенденциями в развитии информационных технологий на производстве становится применение теории и практики киберфизических производственных систем [1]. Традиционные методы проектирования, такие как имитационные и корреляционные модели, уступают свое место технологичным подходам к описанию объектов реального мира в виртуальной среде. Например, цифровой двойник в максимальной степени приближается по сложности его описания, прогнозированию его свойств, функций и поведения, по его реакции на возмущающие воздействия с другими цифровыми двойниками к поведению объектов реального мира [2].

За последние десять лет интерес к киберфизическим системам существенно возрос, на что указывает рост числа научных публикаций, с описанием концепций, методик применения цифровых двойников: в компьютерном интеграционном производстве (Computer-Integrated Manufacturing, CIM) [3]; информационном моделировании зданий (Building Information Modeling, BIM) [4]; мониторинге состояния машин и механизмов [5]; в виртуальных производственных системах [6]. Так концепцию CIM можно считать предысторией теории и практического применения цифровых двойников. CIM-модели в максимальной степени приближены к объектам реального мира, дают высокую точность их описания и могут адекватно представлять процессы, в которых они принимают участие.

Согласно исследованию [1], основное назначение киберфизической системы состоит в обеспечении обратных связей между физическими объектами и их виртуальными аналогами. Мехатронные системы могут трансформироваться в киберфизические системы путем расширения каналов взаимодействия реального и виртуального объектов, а также используя вычислительные возможности интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ). В случае производственных систем

в качестве ИЭУ выступают программно-логические контроллеры, серверное и коммуникационное оборудование, датчики интернета вещей.

Проектирование киберфизических систем [7] осуществляется с использованием программно-ориентированного подхода, в то время как для мехатронных систем применяется аппаратный подход. Программно-ориентированный подход к проектированию киберфизических систем согласно [8] заключается в дематериализации и функциональной интеграции производственных систем. Дематериализация предоставляет новые функциональные возможности для анализа производственных процессов, а функциональная интеграция объектов реального и виртуального пространств создает контуры обратной связи, влияя на физические процессы, и наоборот.

Производственные системы Индустрии 4.0 должны обеспечивать управление между физическими компонентами и вычислительными возможностями. Однако на сегодняшний день для проектирования, реализации и эксплуатации производственных систем на практике все еще не используют программно-ориентированный подход к разработке цифровых моделей объектов и процессов. Производители оборудования по-прежнему применяют последовательное проектирование, ориентированное на механику [9]. Для надежности и предсказуемости работы производственных систем на всех этапах ее жизненного цикла необходимо применение цифровой среды проектирования, которая способна обеспечить анализ производительности компонентов системы и управление их ошибками в реальном времени [10].

В настоящее время в зарубежных научных изданиях появляются исследования и попытки практического использования программно-ориентированного подхода для совершенствования существующих производственных систем на предприятиях. Однако отсутствует унифицированный подход к использованию преимуществ программно-ориентированного подхода для произ-

водственных систем на этапах их жизненного цикла. В связи с этим необходимо:

- провести анализ современной концепции цифрового двойника применительно к производственным системам;
- определить основные характеристики цифрового двойника, дающие новые функциональные возможности для анализа производственных процессов;
- оценить преимущества и недостатки использования данного подхода на производстве.

Также требуется представить перспективные варианты технической реализации производственных систем с применением концепции цифровых двойников, современных цифровых технологий и ИЭУ.

Этапы становления концепции цифрового двойника

Понятие цифровой двойник было введено Майклом Гривзом и Джоном Викарсом в их работе по управлению жизненным циклом изделия в 2003 году [11]. Первоначальное описание цифрового двойника — это виртуальное представление физического продукта, содержащего информацию об указанном продукте, с его характеристиками в области управления жизненным циклом. Гривз выделяет три компонента цифрового двойника: физический объект, виртуальное представление этого объекта и двунаправленный канал связи для передачи данных от физического к виртуальному объекту, и обратно — от виртуального к физическому. Важный момент концепции цифровых двойников за-

ключается в том, что виртуальное пространство состоит из любого количества подпространств, которые позволяют выполнять определенные виртуальные операции: моделирование, тестирование, оптимизация и др.

В более поздней работе Гривз [12] рассматривает цифровой двойник применительно к жизненному циклу продукта, и вводит понятия: прототипа цифрового двойника, вариаций цифрового двойника, агрегаций цифрового двойника, а также цифровой среды проектирования. Концепция цифрового двойника в контексте жизненного цикла продукта представлена на рис. 1, а основные определения даны в табл. 1.

Цифровой двойник начинает свою жизнь как прототип цифрового двойника на фазе разработки. Для каждого производимого продукта на стадии реализации создаются вариации цифрового двойника, в процессе накопления вариаций цифровых двойников образуются их агрегации. Прототипы, вариации и агрегации цифровых двойников существуют в среде цифрового проектирования, которая представляет собой виртуальное представление среды, в которой существует физический продукт. Это позволяет использовать виртуальные методы, такие как моделирование, оценка и др. Цифровые двойники, их вариации, агрегации и окружающая среда сохраняются после фактического срока службы физического продукта, который заканчивается фазой утилизации.

Базовая концепция цифрового двойника предусматривает систему организации процессов взаимодействия, которые позволяют связать физические объекты с их виртуальными аналогами, используя преимуще-



Рис. 1. Концепция цифрового двойника в контексте жизненного цикла продукта [12]

Таблица 1. Основные понятия концепции цифрового двойника

Термины	Определение
Цифровой двойник	Полное виртуальное описание физического продукта с точностью до микро- и макроуровней
Прототип цифрового двойника	Виртуальное описание прототипа продукта, содержащее всю информацию, необходимую для создания физического прототипа
Вариации цифрового двойника	Конкретные экземпляры физического продукта, которые остаются связанными с реальным продуктом на протяжении их жизни
Агрегации цифрового двойника	Комбинации экземпляров цифрового двойника по какому-либо признаку. Например, по функциональности, структуре, применению и т. п.
Цифровая среда проектирования	Пространство описания и хранения данных о физических явлениях с несколькими областями для работы над цифровыми двойниками, например, полевые структуры, напряженно-деформированное состояние, электромагнитные поля, и т. п.

ства как виртуальной, так и физической среды для эффективного достижения цели физического объекта. В связи с этим в режиме реального времени цифровой двойник позволит контролировать состояние физического объекта и управлять им в режиме процесса. Информация об объекте собирается, хранится, оценивается и применяется для объектов, которые проектируются, создаются в настоящее время, и которые будут создаваться в будущем. По замыслу Гривза, этот процесс позволяет использовать информацию об объекте, полученную путем мониторинга и управления с целью улучшения свойств объекта на протяжении всего его жизненного цикла.

С момента появления первоначальной концепции цифровых двойников появились новые информационные технологии и ИЭУ, которые позволяют усовершенствовать и усилить результат от применения концепции на практике.

Современная концепция цифрового двойника, базовые понятия и их определения

В табл. 2 представлены основные понятия и их определения, относящиеся к современной концепции цифрового двойника применительно к производственным системам. Данный список получен путем анализа научных исследований зарубежных авторов за последние десять лет, касающихся практического применения цифровых двойников. Каждый из выделенных понятий представляет собой ключевой элемент концепции, определенный в литературе как часть цифрового двойника объекта материального мира.

Особенностью современной концепции проектирования с применением цифровых двойников является присутствие физической и виртуальной сред взаимодействия объектов реального и виртуального мира. Физическая среда относится к пространству «реального мира», в котором находится физический объект исследования [13]. Параметры физической среды измеряются и передаются в виртуальную среду цифрового двойника, чтобы обеспечить точное соответствие между состоянием объекта в физической и виртуальной средах, а значит, эффективно контролировать состояние объектов online. Точное соответствие данных сред необходимо для применения функций симуляции и оптимизации, для достижения предполагаемых преимуществ, применения программно-ориентированного подхода к проектированию производственных систем. Физическая среда включает все параметры, которые могут влиять на физический объект, при этом они не должны быть ограничены только теми параметрами, которые измеряются как часть цифрового двойника.

Виртуальная среда существует в цифровой среде проектирования и является зеркалом физической среды, причем синхронизация между средами достигается с помощью физической метрологии, т. е. датчиков реального времени, передающих ключевые измерения от физического объекта к виртуальному [13]. В отличие от физической среды, описание виртуальной среды иногда называют базовой технологией, такой как «база данных», «хранилище данных», «облачная платформа»,

«сервер», «API» (Application Programming Interface, программный интерфейс приложений), и т. п. В постоянно меняющемся технологическом ландшафте невозможно связывать концепцию цифровых двойников с конкретной технологией.

Параметры объектов взаимодействия, влияющие на эффективность применения цифрового двойника

Параметры относятся к типам данных, информации и процессам, которые необходимы для взаимодействия между физическими и виртуальными объектами через цифровую среду. Количество параметров и их детализация влияют на уровень соответствия получаемого цифрового двойника и величину удовлетворенности результатом применения данной технологии на реальном производстве.

В табл. 3 приведены основные параметры физических объектов, используемые в среде проектирования цифрового двойника для эффективного контроля и управления производственными процессами и системами. Параметры получены путем анализа публикаций, посвященных применению концепции цифровых двойников на производстве, и сгруппированы в десять классов, наиболее часто используемых в научных работах зарубежных авторов, и влияющих на эффективность применения программно-ориентированного подхода в проектировании производственных систем. В табл. 3 также приведены ссылки на литературу, где данные параметры анализируются и применяются на практике.

Необходимым условием функционирования киберфизических систем является наличие физико-виртуальных связей между физическим объектом и его виртуальным аналогом. Физико-виртуальные связи — это средства, с помощью которых состояние физического объекта передается в виртуальную среду и реализуется в ней, т. е. происходит обновление виртуальных параметров таким образом, чтобы они отражали текущее состояние физических параметров. К ним относятся датчики интернета вещей [36], сервисы [37], 5G [29], и т. п.

Описание цифрового двойника невозможно без физического и виртуального взаимодействия между объектами. Соединение состоит из фазы метрологии, в которой фиксируется состояние физического объекта, и фазы реализации, в которой рассчитывается погрешность между физической и виртуальной моделями. На рис. 2 показан этот процесс.

Например, изменение температуры физического двигателя осуществляется с помощью датчика температуры интернета вещей (фаза метрологии), измерение температуры передается в виртуальную среду через веб-сервис. Виртуальный процесс определяет разницу температур между физическим и виртуальным двигателями, а затем обновляет виртуальный двигатель таким образом, чтобы оба измерения были одинаковыми (фаза реализации).

Эта непрерывная связь между физическим и виртуальными объектами является одним из отличительных признаков программно-ориентированного подхода к проектированию с применением цифровых двой-

Таблица 2. Термины и определения современной концепции цифрового двойника

Термины	Определение
Физический объект	Реальный объект материального мира. Например: транспортное средство, компонент, продукт, система, модель
Виртуальный объект	Генерируемое компьютером представление физического объекта, например: транспортного средства, компонента, продукта, системы, модели
Физическая среда	Среда реального мира, в которой можно осуществлять изменения и получать воспроизводимые результаты
Виртуальная среда	Любое количество виртуальных пространств или симуляций, которые воспроизводят состояние физической среды и предназначены для конкретных случаев использования, например, мониторинга состояния здоровья, оптимизации графика производства
Достоверность	Количество параметров, передаваемых между физическими и виртуальными объектами, их точность и уровень абстракции
Состояние объекта	Значение контролируемых на данный момент времени параметров: физического и виртуального объектов; внешней среды
Параметры объекта	Типы данных, информации и процессов, передаваемых между объектами, например: температура, показатели функционирования производственной системы
Метрология	Процедура измерения состояния физического или виртуального объекта
Управляющее воздействие	Процедура изменения состояния физического или виртуального объекта
Физико-виртуальное соединение	Соединение от физической к виртуальной среде. Содержит физическую метрологию, которая представляет собой единую систему: методов, средств измерения физического объекта и внешней среды, этапов виртуальной реализации
Виртуально-физическое соединение	Соединение от виртуальной к физической среде. Содержит этапы виртуальной метрологии, которая представляет собой единую систему: методов, средств расчета, прогнозирования параметров физического объекта и внешней среды, этапов физической реализации
Синхронизация/скорость синхронизации	Акт синхронизации между двумя объектами и скорость, с которой происходит синхронизация
Физические процессы	Физические цели и процессы, в которых участвует физическое лицо, например, производственная линия
Виртуальные процессы	Вычислительные методы, используемые в виртуальной среде, например: оптимизация, прогнозирование, моделирование, анализ производственных мощностей
Воспринимаемые преимущества	Предполагаемые преимущества, достигнутые в реализации применения технологии цифрового двойника. Например: снижение энергоемкости, материалоемкости изделия; улучшенный дизайн; структура; технологичность, и т. п.
Жизненный цикл цифрового двойника	Жизненный цикл цифрового двойника включает в себя такие этапы как создание цифрового профиля, сбор данных, хранение и использование до их удаления из киберфизической среды
Варианты использования	Применение цифрового двойника, например: снижение затрат; улучшение обслуживания; поддержка принятия решений и другие варианты его использования
Технические реализации	Технологии поддержки жизненных циклов цифрового двойника
Уровни достоверности	Количество параметров, их точность и уровень абстракции, которые передаются между виртуальной и физической средами
Владение данными	Право собственности на данные, хранящиеся в цифровом двойнике
Интеграция между виртуальными объектами	Методы, необходимые для обеспечения связи между различными виртуальными объектами

ников от традиционных методов проектирования, где анализ выполняется для каждой среды в автономном режиме. Физико-виртуальное соединение позволяет осуществлять мониторинг изменений состояния, происходящего под влиянием физической и виртуальной сред. Например, если бы изменение частоты вращения двигателя произошло вследствие влияния температуры, то физико-виртуальное соединение оценило и измерило бы эффект этого вмешательства.

Виртуально-физическая связь представлена потоком информации и процессов от виртуального к физическому объекту, т. е. цифровой двойник содержит функциональные возможности для физического влияния на состояние реального объекта. Например, на практике такую возможность используют для управления ПЛК (программируемый логический контроллер) [38], технологическим процессом [39], параметрами машины [40] и управлением производством [41], и т. п.

Таблица 3. Основные параметры и примеры использования

Параметры	Определение	Примеры
Форма	Геометрическая структура объекта	Геометрия объекта [14], износ [2], допуски [12], система координат [15], параметры заготовки (прочность, твердость) [16]
Функциональность	Движение и/или цель объекта	Функциональные возможности [17], контроль [18], параметры станка (скорость шпинделя, скорость подачи) [16], функциональная модель [19], биохимическая модель [20], общая модель [13]
Здоровье	Фактическое состояние объекта по отношению к его идеальному состоянию	Анализ [20], контроль [21]
Расположение	Географическое положение объекта	Расположение объекта в отношении окружающей среды, макетов, производства [22, 23]
Процесс	Виды деятельности, в которых участвует объект	Параметры планирования (последовательность, время простоя) [13], моделирование [24], логистика [25], общие сведения [26]
Время	Время, затраченное на выполнение действия, и дата/время выполнения действия	Своевременность реагирования [27], время простоя и время работы [16], время производственного процесса [26], время воздействия [28]
Состояние	Текущее измеренное состояние всех параметров объекта и среды	Состояние производственного процесса [29], эксплуатация [30], состояние производственной среды [17], целостность технологических процессов [27], состояние человека [20], обобщенное состояние [31]
Производительность	Измеренная производительность предприятия по сравнению с ее оптимальным значением	Производительность компонентов системы [32], общая производительность системы [33]
Окружающая среда	Физическая и виртуальная среды, в которых существует объект	Параметры физической среды [34], параметры виртуальной среды [35]
Качественные показатели	Информация, которая является качественной и поэтому, как правило, не поддается измерению традиционными датчиками	Субъективные представления о полезности продукта [13], требования к заказу продукции [29], требования к квалификации работника [26]

Виртуально-физическая связь также проходит через фазу метрологии и фазу реализации.

Двунаправленное взаимодействие виртуального и физического объектов дает преимущество программно-ориентированным методам проектирования с применением цифровых двойников, так как является универсальным и востребованным на производстве.

Фактически цифровой двойник, имеющий как физическую, так и виртуальную связь, может выдвинуть гипотезу, а затем выполнить, проверить и скорректировать эту гипотезу в непрерывном цикле адаптации при проектировании, производстве и управлении физическим объектом.

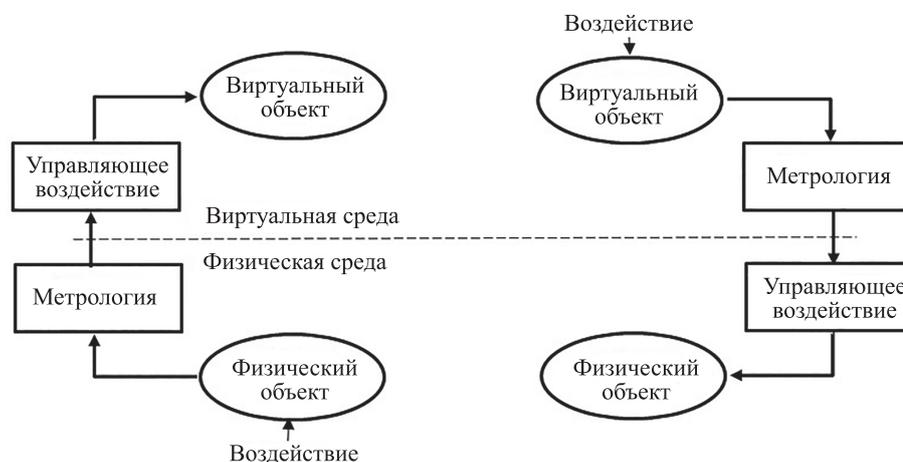


Рис. 2. Двунаправленный процесс взаимодействия физического и виртуального объектов

Физические и виртуальные производственные процессы в рамках концепции цифровых двойников

Физические процессы относятся к деятельности, выполняемой физическим объектом в физической среде. Наиболее распространенные примеры связаны с производственными системами на предприятиях [42–45], в частности, умные фабрики [46], производство чугуна и стали [13], 3D-печать [28], управлением мобильными роботами [34], инженерное проектирование [47], а также контролем состояния здоровья и биомеханических процессов [20]. Во время физических процессов происходят изменения параметров физического объекта, и эти изменения состояния фиксируются и переводятся к его виртуальному аналогу.

Виртуальные процессы относятся к действиям, выполняемым с использованием виртуального объекта в виртуальной среде. Подавляющее большинство этих процессов связано с моделированием и оптимизацией [47–51], а также мониторингом, диагностикой и прогнозированием здоровья [52–54]. Эти процессы приводят к изменению параметров виртуального объекта, состояние которого затем может быть проанализировано и реализовано на физическом объекте.

На рис. 3 представлен процесс двунаправленной синхронизации параметров объектов физической и виртуальной сред посредством применения концепции цифровых двойников для производственных систем.

На рис. 3 показано, как физические и виртуальные процессы действуют на соответствующие физический и виртуальный объекты, где эти процессы генерируют изменение состояния этого объекта через его параметры. Изменение состояния фиксируется с помощью метрологических методов, передается через физико-виртуальные и виртуально-физические соединения и реализуется в другой среде путем синхронизации всех параметров. Как виртуальные, так и физические

среды содержат средства для измерения и реализации управляющего воздействия.

Процесс изменений → метрология → управление — это процесс синхронизации, и он работает в обоих направлениях — от виртуального к физическому и от физического к виртуальному объектам.

Применение технологии цифровых двойников на этапах жизненного цикла производственных систем

Поскольку виртуальный объект может храниться длительное время, он в итоге превосходит сам физический объект с постоянной потенциальной ценностью для будущего анализа, даже после утилизации физического объекта. Исходя из этого, применение технологии цифрового двойника возможно на всем этапах жизненного цикла продукта.

На рис. 4 представлен результат исследования практического применения технологии цифрового двойника на разных этапах жизненного цикла производственных систем, включая этапы: идея, проект, реализация, эксплуатация, утилизация.

Проведенное исследование показывает, что на настоящий момент времени практическое применение цифровых двойников в основном сосредоточено на этапах реализации и эксплуатации в жизненном цикле производственной системы, и что в большинстве случаев методологии применения отличаются друг от друга [24, 44]. Существует незначительное количество исследований, в которых основное внимание уделяется концепции цифровых двойников [45] или рассматривается вопрос о цифровом двойнике на протяжении всего жизненного цикла [12], в то время как существует большое количество методов реализаций, в которых представлена интерпретация цифрового двойника для конкретного использования [42–47]. Существуют проблемы в знаниях в контексте применимости цифровых



Рис. 3. Двунаправленная синхронизация объектов физической и виртуальной сред посредством применения концепции цифровых двойников для производственных систем

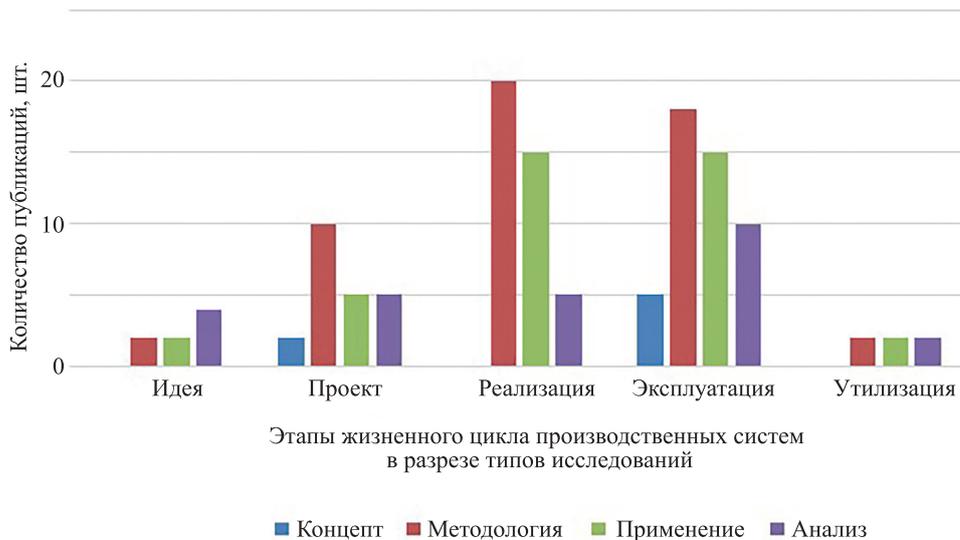


Рис. 4. Применение технологии цифрового двойника на разных этапах жизненного цикла производственных систем

двойников к более ранним этапам жизненного цикла и утилизации, поэтому отсутствие детального изучения цифровых двойников на протяжении жизненного цикла подразумевает, что возможности для получения выгоды на сегодняшний день могут быть упущены.

Варианты технической реализации современной концепции цифрового двойника в производственных системах

На рис. 5 показаны варианты технической реализации современной концепции цифрового двойника в производственных системах. Варианты реализации сопоставлены с циклом синхронизации данных физического и виртуального объектов, причем сопоставление основано на наиболее подходящем размещении для каждого варианта использования. Например, на рис. 5, а *симуляция, обработка данных и оптимизация* — все это виртуальные процессы, и поэтому они расположены на виртуальной стороне цикла. В то время как *умный автомобиль и интеллектуальное производство* — это физические объекты, поэтому они расположены на физической стороне цикла. Варианты использования, расположенные в центре цикла, относятся ко всему циклу синхронизации. *Компьютерное обучение, мониторинг здоровья, проектирование продукта на основе данных и мониторинг данных* содержат как физические, так и виртуальные объекты со связями между ними. Из сопоставления становится очевидным, что большинство сценариев использования включают в себя аспекты взаимодействия физического и виртуального объектов.

На рис. 5, б цифровые технологии размещаются в той зоне цикла, где они используются. *Облачные технологии, базы данных и API* относятся к виртуальным технологиям. В то время как *сенсоры, актуаторы и RFID (Radio Frequency Identification) технологии*, используются для физических объектов и процессов. Технологии, размещенные в центре цикла, применимы ко всему циклу, например, *5G и беспроводная связь*

используются как для физических, так и для виртуальных соединений. ИУЭ с технологией IoT (Internet of Things, интернет вещей) обеспечивают фазу метрологии и управления на всем цикле синхронизации физического и виртуального объектов.

Иначе говоря, на рис. 5, а показаны ИЭУ, а на рис. 5, б показаны цифровые технологии, которые предлагается использовать при реализации концепции цифровых двойников на этапах жизненного цикла производственных систем. Из рисунков следует, что цифровой двойник в значительной степени зависит от датчиков IoT для создания синхронного соединения между физическим и виртуальным объектами. В соответствии с этим, датчики используются для сбора данных, а исполнительные механизмы — для реализации изменений в физической среде. Цифровой двойник строится на основе существующих технологий, которые разрабатываются независимо от его концепции. Хотя это имеет преимущества с точки зрения стоимости и доступности технологий, однако, вопрос об оптимальности этой технологии для целей и задач промышленного применения остается открытым.

Преимущества и недостатки применение концепции цифровых двойников в производственных системах

В рассмотренных исследованиях можно выделить ряд потенциальных и предполагаемых преимуществ, связанных с применением концепции цифрового двойника в производственных системах. К ним относятся: снижение затрат на производство продукции [11, 28], рисков и времени проектирования [45]; уменьшение сложности и времени перенастройки системы [19]; улучшение послепродажного обслуживания [36]; увеличение эффективности принятия решений о техническом обслуживании [52], безопасности и надежности [54], управления производством [39]; повышение гибкости и конкурентоспособности производственной системы [30]; содействие инновациям [11].

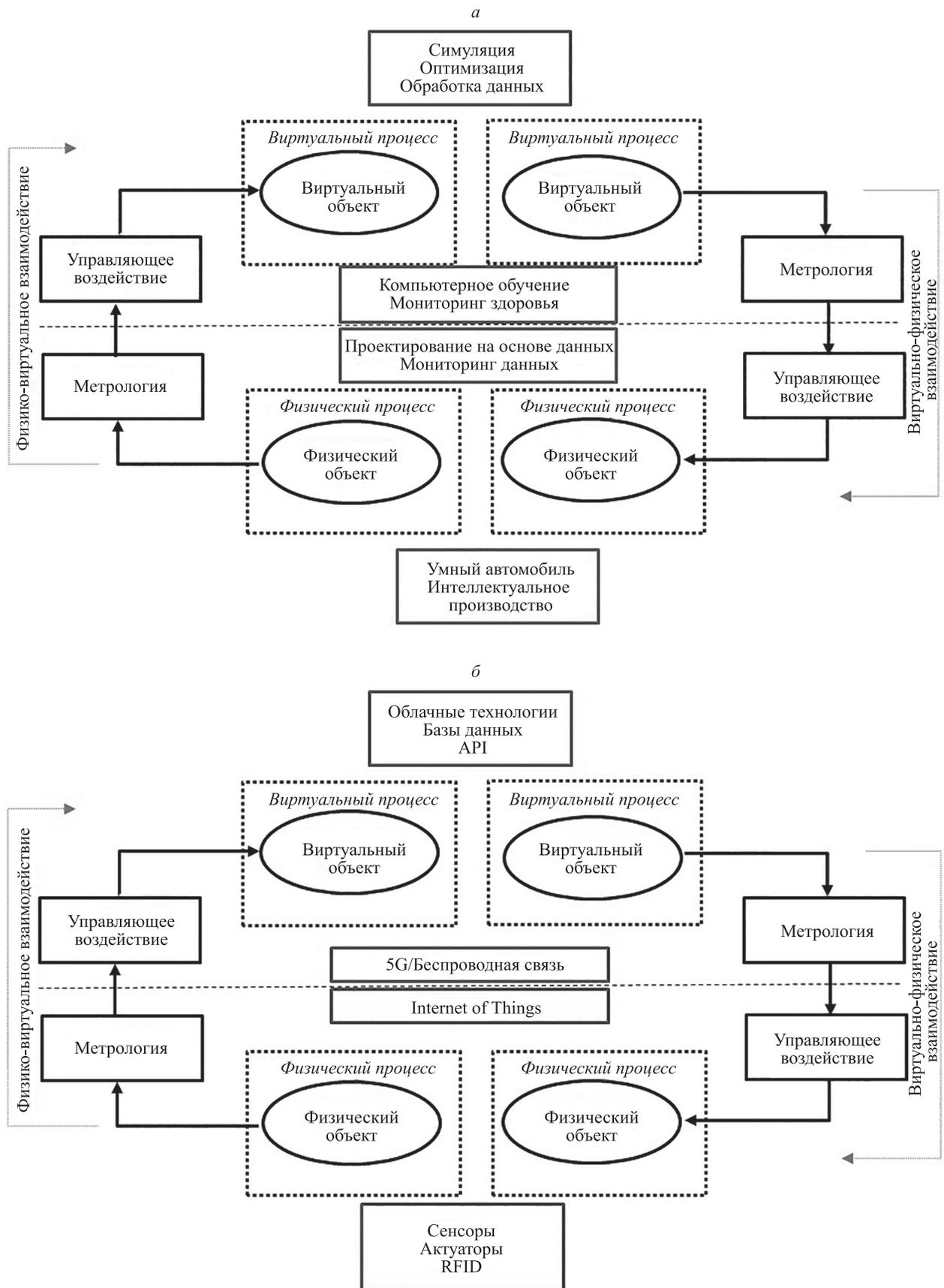


Рис. 5. Варианты технической реализации концепции цифровых двойников для производственных систем с применением: интеллектуальных электронных устройств (*а*); цифровых технологий (*б*)

Проведенный анализ научных публикаций зарубежных авторов подтверждает существующие на данный момент проблемы, связанные с отсутствием убедительных примеров, показывающих на практике эффект от использования цифровых двойников. Это связано с необходимостью затратного реинжиниринга производственной системы, чтобы обеспечить эффективность использования цифровых двойников на производстве. Трудно оправдать существенные изменения в производственной системе без понимания окупаемости инвестиций, при существующих сложностях в определении преимуществ использования цифрового двойника для каждой отрасли. Требуется значительные усилия по описанию и количественной оценке этих преимуществ, сложно даже предположить, что сама концепция цифрового двойника может быть наиболее подходящим решением проблем, стоящих перед каждой конкретной отраслью. Дальнейшая работа в этой области необходима для оценки применимости концепции цифрового двойника для конкретных производственных систем, где может быть достигнута их эффективность и определены ее пределы. Установление этой рентабельности имеет важное значение для промышленного применения.

Заключение

В настоящем обзоре проведен ретроспективный анализ концепции цифровых двойников применительно к производственным системам. Обобщены результаты научных исследований за последние десять лет, в которых в той или иной мере затрагиваются теоретические и практические вопросы применения цифровых двойников в производственных системах. Определены характеристики и параметры цифрового двойника, создающие потенциальные преимущества его применения при использовании программно-ориентированного подхода к проектированию, реализации и эксплуатации производственных систем и процессов. Представлены варианты технической реализации концепции цифровых двойников для производственных систем с применением цифровых технологий и интеллектуальных электронных устройств. Выполнен анализ применимости технологии цифровых двойников на разных этапах жизненного цикла производственных систем. Систематизированы преимущества и недостатки создания производственных систем с применением концепции цифровых двойников. Обзор полезен для научных работников, аспирантов и студентов, которые занимаются теорией и практикой применения цифровых двойников на производстве.

Литература

1. Radhakisan B., Gill H. Cyber-physical systems // *The Impact of Control Technology*. 2011. P. 161–166.
2. Rosen R., Wichert G., Lo G., Bettenhausen K.D. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. V. 48. N 3. P. 567–572. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141
3. Laengle S., Modak N.M., Merigó J.M., De La Sotta C. Thirty years of the international journal of computer integrated manufacturing: a bibliometric analysis // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2018. V. 31. N 12. P. 1247–1268. doi: 10.1080/0951192X.2018.1529434
4. Abramovici M., Göbel J.C., Savarino P. Reconfiguration of smart products during their use phase based on virtual product twins // *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2017. V. 66. N 1. P. 165–168. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.042
5. Ayani M., Ganebäck M., Ng A.H.C. Digital Twin: applying emulation for machine reconditioning // *Procedia CIRP*. 2018. V. 82. P. 243–248. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.139
6. Baruffaldi G., Accorsi R., Manzini R. Warehouse management system customization and information availability in 3pl companies: a decision-support tool // *Industrial Management & Data Systems*. 2019. V. 119. N 2. P. 251–273. doi: 10.1108/IMDS-01-2018-0033
7. Stark R., Kind S., Neumeyer S. Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design // *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2017. V. 66. N 1. P. 169–172. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.045
8. Guerineau B., Bricogne M., Durupt A., Rivest L. Mechatronics vs. cyber physical systems: Towards a conceptual framework for a suitable design methodology // *Proc. 11th France–Japan and 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) / 17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*. Compiègne, France. 2016. P. 314–320. doi: 10.1109/MECATRONICS.2016.7547161
9. Lee E.A. Cyber physical systems: design challenges // *Proc. 11th IEEE International Symposium on Object/Component/Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC 2008)*. Orlando, FL, USA. 2008. P. 363–369. doi: 10.1109/ISORC.2008.25

References

1. Radhakisan B., Gill H. Cyber-physical systems. *The Impact of Control Technology*, 2011, pp. 161–166.
2. Rosen R., Wichert G., Lo G., Bettenhausen K.D. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 48, no. 3, pp. 567–572. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141
3. Laengle S., Modak N.M., Merigó J.M., De La Sotta C. Thirty years of the international journal of computer integrated manufacturing: a bibliometric analysis. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2018, vol. 31, no. 12, pp. 1247–1268. doi: 10.1080/0951192X.2018.1529434
4. Abramovici M., Göbel J.C., Savarino P. Reconfiguration of smart products during their use phase based on virtual product twins. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2017, vol. 66, no. 1, pp. 165–168. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.042
5. Ayani M., Ganebäck M., Ng A.H.C. Digital Twin: applying emulation for machine reconditioning. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 82, pp. 243–248. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.139
6. Baruffaldi G., Accorsi R., Manzini R. Warehouse management system customization and information availability in 3pl companies: a decision-support tool. *Industrial Management & Data Systems*, 2019, vol. 119, no. 2, pp. 251–273. doi: 10.1108/IMDS-01-2018-0033
7. Stark R., Kind S., Neumeyer S. Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2017, vol. 66, no. 1, pp. 169–172. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.045
8. Guerineau B., Bricogne M., Durupt A., Rivest L. Mechatronics vs. cyber physical systems: Towards a conceptual framework for a suitable design methodology. *Proc. 11th France–Japan and 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS)/17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, Compiègne, France, 2016, pp. 314–320. doi: 10.1109/MECATRONICS.2016.7547161
9. Lee E.A. Cyber physical systems: design challenges. *Proc. 11th IEEE International Symposium on Object/Component/Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC 2008)*, Orlando, FL, USA, 2008, pp. 363–369. doi: 10.1109/ISORC.2008.25

10. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems // *Manufacturing Letters*. 2015. V. 3. P. 18–23. doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001
11. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication // *White paper*. 2014. V. 1. P. 1–7.
12. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. Springer, 2017. P. 85–113. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7_4
13. Xiang F., Zhi Z., Jiang G. Digital twins technology and its data fusion in iron and steel product life cycle // *Proc. 15th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*. 2018. P. 1–5. doi: 10.1109/ICNSC.2018.8361293
14. Söderberg R., Wärmeffjord K., Carlson J.S., Lindkvist L. Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production // *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2017. V. 66. P. 137–140. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.038
15. Guo F., Zou F., Liu J., Wang Z. Working mode in aircraft manufacturing based on digital coordination model // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. V. 98. N 5-8. P. 1547–1571. doi: 10.1007/s00170-018-2048-0
16. Zhang M., Zuo Y., Tao F. Equipment energy consumption management in digital twin shop-floor: A framework and potential applications // *Proc. 15th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*. 2018. P. 1–5. doi: 10.1109/ICNSC.2018.8361272
17. Miled Z.B., French M.O. Towards a reasoning framework for digital clones using the digital thread // *Proc. 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting*. 2017. P. 0873. doi: 10.2514/6.2017-0873
18. Schroeder G.N., Steinmetz C., Pereira C.E., Espindola D.B. Digital twin data modeling with automationML and a communication methodology for data exchange // *IFAC-PapersOnLine*. 2016. V. 49. N 30. P. 12–17. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.11.115
19. Talkhestani B.A., Jazdi N., Schloegl W., Weyrich M. Consistency check to synchronize the Digital Twin of manufacturing automation based on anchor points // *Procedia CIRP*. 2018. V. 72. P. 159–164. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.166
20. Torkamani A., Andersen K.G., Steinhubl S.R., Topol E.J. High-definition medicine // *Cell*. 2017. V. 170. N 5. P. 828–843. doi: 10.1016/j.cell.2017.08.007
21. Glaessgen E., Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles // *Proc. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA*. 2012. P. 1818. doi: 10.2514/6.2012-1818
22. Cai Y., Starly B., Cohen P., Lee Y.-S. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing // *Procedia Manufacturing*. 2017. V. 10. P. 1031–1042. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.094
23. 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. V. 5. P. 26901–26911. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2766453
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. V. 49. N 31. P. 97–102. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.12.168
25. Guo J., Zhao N., Sun L., Zhang S. Modular based flexible digital twin for factory design // *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2019. V. 10. N 3. P. 1189–1200. doi: 10.1007/s12652-018-0953-6
26. Uhlemann T.H.J., Schock C., Lehmann C., Freiberger S., Steinhilper R. The digital twin: demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems // *Procedia Manufacturing*. 2017. V. 9. P. 113–120. doi: 10.1016/j.promfg.2017.04.043
27. Kraft E.M. Developing a digital thread / digital twin aerodynamic performance authoritative truth source // *Proc. 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. 2018. P. 4003. doi: 10.2514/6.2018-4003
28. Hu L., Nguyen N.T., Tao W., Leu M.C., Liu X.F., Shahriar M.R., Al Sunn S.M.N. Modeling of cloud-based digital twins for smart manufacturing with MT connect // *Procedia Manufacturing*. 2018. V. 26. P. 1193–1203. doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.155
29. Cheng J., Chen W., Tao F., Lin C.-L. Industrial IoT in 5G environment towards smart manufacturing // *Journal of Industrial Information Integration*. 2018. V. 10. P. 10–19. doi: 10.1016/j.jii.2018.04.001
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, pp. 18–23. doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001
11. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper*, 2014, vol. 1, pp. 1–7.
12. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. Springer, 2017, pp. 85–113. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7_4
13. Xiang F., Zhi Z., Jiang G. Digital twins technology and its data fusion in iron and steel product life cycle. *Proc. 15th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICNSC.2018.8361293
14. Söderberg R., Wärmeffjord K., Carlson J.S., Lindkvist L. Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2017, vol. 66, pp. 137–140. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.038
15. Guo F., Zou F., Liu J., Wang Z. Working mode in aircraft manufacturing based on digital coordination model. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 98, no. 5-8, pp. 1547–1571. doi: 10.1007/s00170-018-2048-0
16. Zhang M., Zuo Y., Tao F. Equipment energy consumption management in digital twin shop-floor: A framework and potential applications. *Proc. 15th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICNSC.2018.8361272
17. Miled Z.B., French M.O. Towards a reasoning framework for digital clones using the digital thread. *Proc. 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2017, pp. 0873. doi: 10.2514/6.2017-0873
18. Schroeder G.N., Steinmetz C., Pereira C.E., Espindola D.B. Digital twin data modeling with automationML and a communication methodology for data exchange. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49, no. 30, pp. 12–17. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.11.115
19. Talkhestani B.A., Jazdi N., Schloegl W., Weyrich M. Consistency check to synchronize the Digital Twin of manufacturing automation based on anchor points. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 72, pp. 159–164. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.166
20. Torkamani A., Andersen K.G., Steinhubl S.R., Topol E.J. High-definition medicine. *Cell*, 2017, vol. 170, no. 5, pp. 828–843. doi: 10.1016/j.cell.2017.08.007
21. Glaessgen E., Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles. *Proc. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA*, 2012, pp. 1818. doi: 10.2514/6.2012-1818
22. Cai Y., Starly B., Cohen P., Lee Y.-S. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 10, pp. 1031–1042. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.094
23. 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, pp. 26901–26911. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2766453
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, no. 31, pp. 97–102. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.12.168
25. Guo J., Zhao N., Sun L., Zhang S. Modular based flexible digital twin for factory design. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 1189–1200. doi: 10.1007/s12652-018-0953-6
26. Uhlemann T.H.J., Schock C., Lehmann C., Freiberger S., Steinhilper R. The digital twin: demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 9, pp. 113–120. doi: 10.1016/j.promfg.2017.04.043
27. Kraft E.M. Developing a digital thread / digital twin aerodynamic performance authoritative truth source. *Proc. 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, 2018, pp. 4003. doi: 10.2514/6.2018-4003
28. Hu L., Nguyen N.T., Tao W., Leu M.C., Liu X.F., Shahriar M.R., Al Sunn S.M.N. Modeling of cloud-based digital twins for smart manufacturing with MT connect. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 26, pp. 1193–1203. doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.155
29. Cheng J., Chen W., Tao F., Lin C.-L. Industrial IoT in 5G environment towards smart manufacturing. *Journal of Industrial Information Integration*, 2018, vol. 10, pp. 10–19. doi: 10.1016/j.jii.2018.04.001

30. Qi Q., Tao F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison // *IEEE Access*. 2018. V. 6. P. 3585–3593. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2793265
31. Schleich B., Anwer N., Mathieu L., Wartzack S. Shaping the digital twin for design and production engineering // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2017. V. 66. N 1. P. 141–144. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.040
32. Lorenz M., Rüßmann M., Gerbert P., Waldner M., Justus J., Engel P., Harnisch M. Industry 4.0: the future of productivity and growth in manufacturing industries. Boston Consulting Group, 2015. 20 p. [Электронный ресурс]. URL: https://image-src.bcg.com/Images/Industry_40_Future_of_Productivity_April_2015_tcm9-61694.pdf (дата обращения: 04.09.2020).
33. Kuts V., Modoni G.E., Terkaj W., Tähemaa T., Sacco M., Otto T. Exploiting factory telemetry to support virtual reality simulation in robotics cell // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2017. V. 10324. P. 212–221. doi: 10.1007/978-3-319-60922-5_16
34. Zhang H., Zhang G., Yan Q. Dynamic resource allocation optimization for digital twin-driven smart shopfloor // *Proc. 15th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*. 2018. P. 1–5. doi: 10.1109/ICNSC.2018.8361283
35. Leng J., Zhang H., Yan D., Liu Q., Chen X., Zhang D. Digital twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop // *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2019. V. 10. N 3. P. 1155–1166. doi: 10.1007/s12652-018-0881-5
36. Cheng Y., Zhang Y., Ji P., Xu W., Zhou Z., Tao F. Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. V. 97. N 1-4. P. 1209–1221. doi: 10.1007/s00170-018-2001-2
37. Zheng Y., Yang S., Cheng H. An application framework of digital twin and its case study // *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2019. V. 10. N 3. P. 1141–1153. doi: 10.1007/s12652-018-0911-3
38. Botkina D., Hedlind M., Olsson B., Henser J., Lundholm T. Digital twin of a cutting tool // *Procedia CIRP*. 2018. V. 72. P. 215–218. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.178
39. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital twin in manufacturing: a categorical literature review and classification // *IFAC-PapersOnLine*. 2018. V. 51. N 11. P. 1016–1022. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474
40. Lohtander M., Ahonen N., Lanz M., Ratava J., Kaakkunen J. Micro manufacturing unit and the corresponding 3D-model for the digital twin // *Procedia Manufacturing*. 2018. V. 25. P. 55–61. doi: 10.1016/j.promfg.2018.06.057
41. Zhuang C., Liu J., Xiong H. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. V. 96. N 1-4. P. 1149–1163. doi: 10.1007/s00170-018-1617-6
42. Clement S.J., McKee D.W., Romano R., Xu J., Lopez J.M., Battersby D. The Internet of Simulation: enabling agile model based systems engineering for cyber-physical systems // *Proc. 12th System of Systems Engineering Conference (SoSE)*. 2017. P. 7994948. doi: 10.1109/SYSOSE.2017.7994948
43. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems // *Procedia Manufacturing*. 2017. V. 11. P. 939–948. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.198
44. Stark J. Product lifecycle management // *Product Lifecycle Management (V. 1). 21st Century Paradigm for Product Realisation*. Springer, 2015. P. 1–29. doi: 10.1007/978-3-319-17440-2_1
45. Damjanovic-Behrendt V. A digital twin-based privacy enhancement mechanism for the automotive industry // *Proc. 9th International Conference on Intelligent Systems (IS)*. 2018. P. 272–279. doi: 10.1109/IS.2018.8710526
46. Beregi R., Szaller Á., Kádár B. Synergy of multi-modelling for process control // *IFAC-PapersOnLine*. 2018. V. 51. N 11. P. 1023–1028. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.473
47. Zheng P., Lin T.J., Chen C.H., Xu X. A systematic design approach for service innovation of smart product-service systems // *Journal of Cleaner Production*. 2018. V. 201. P. 657–667. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.101
48. Luo W., Hu T., Zhang C., Wei Y. Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy. *Journal of Ambient Intelligence and*
30. Qi Q., Tao F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 3585–3593. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2793265
31. Schleich B., Anwer N., Mathieu L., Wartzack S. Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2017, vol. 66, no. 1, pp. 141–144. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.040
32. Lorenz M., Rüßmann M., Gerbert P., Waldner M., Justus J., Engel P., Harnisch M. *Industry 4.0: the future of productivity and growth in manufacturing industries*. Boston Consulting Group, 2015, 20 p. Available at: https://image-src.bcg.com/Images/Industry_40_Future_of_Productivity_April_2015_tcm9-61694.pdf (accessed: 04.09.2020).
33. Kuts V., Modoni G.E., Terkaj W., Tähemaa T., Sacco M., Otto T. Exploiting factory telemetry to support virtual reality simulation in robotics cell. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2017, vol. 10324, pp. 212–221. doi: 10.1007/978-3-319-60922-5_16
34. Zhang H., Zhang G., Yan Q. Dynamic resource allocation optimization for digital twin-driven smart shopfloor. *Proc. 15th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICNSC.2018.8361283
35. Leng J., Zhang H., Yan D., Liu Q., Chen X., Zhang D. Digital twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 1155–1166. doi: 10.1007/s12652-018-0881-5
36. Cheng Y., Zhang Y., Ji P., Xu W., Zhou Z., Tao F. Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 97, no. 1-4, pp. 1209–1221. doi: 10.1007/s00170-018-2001-2
37. Zheng Y., Yang S., Cheng H. An application framework of digital twin and its case study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 1141–1153. doi: 10.1007/s12652-018-0911-3
38. Botkina D., Hedlind M., Olsson B., Henser J., Lundholm T. Digital twin of a cutting tool. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 72, pp. 215–218. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.178
39. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474
40. Lohtander M., Ahonen N., Lanz M., Ratava J., Kaakkunen J. Micro manufacturing unit and the corresponding 3D-model for the digital twin. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 25, pp. 55–61. doi: 10.1016/j.promfg.2018.06.057
41. Zhuang C., Liu J., Xiong H. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 96, no. 1-4, pp. 1149–1163. doi: 10.1007/s00170-018-1617-6
42. Clement S.J., McKee D.W., Romano R., Xu J., Lopez J.M., Battersby D. The Internet of Simulation: enabling agile model based systems engineering for cyber-physical systems. *Proc. 12th System of Systems Engineering Conference (SoSE)*, 2017, pp. 7994948. doi: 10.1109/SYSOSE.2017.7994948
43. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 11, pp. 939–948. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.198
44. Stark J. Product lifecycle management. *Product Lifecycle Management (V. 1). 21st Century Paradigm for Product Realisation*. Springer, 2015, pp. 1–29. doi: 10.1007/978-3-319-17440-2_1
45. Damjanovic-Behrendt V. A digital twin-based privacy enhancement mechanism for the automotive industry. *Proc. 9th International Conference on Intelligent Systems (IS)*, 2018, pp. 272–279. doi: 10.1109/IS.2018.8710526
46. Beregi R., Szaller Á., Kádár B. Synergy of multi-modelling for process control. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 11, pp. 1023–1028. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.473
47. Zheng P., Lin T.J., Chen C.H., Xu X. A systematic design approach for service innovation of smart product-service systems. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 201, pp. 657–667. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.101
48. Luo W., Hu T., Zhang C., Wei Y. Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy. *Journal of Ambient Intelligence and*

48. Luo W., Hu T., Zhang C., Wei Y. Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy // *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2019. V. 10. N 3. P. 1129–1140. doi: 10.1007/s12652-018-0946-5
49. Schroeder G., Steinmetz C., Pereira C.E., Muller I., Garcia N., Espindola D., Rodrigues R. Visualising the digital twin using web services and augmented reality // *Proc. 14th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. 2016. P. 522–527. doi: 10.1109/INDIN.2016.7819217
50. El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies // *IEEE MultiMedia*. 2018. V. 25. N 2. P. 87–92. doi: 10.1109/MMUL.2018.023121167
51. Qi Q., Tao F., Zuo Y., Zhao D. Digital twin service towards smart manufacturing // *Procedia CIRP*. 2018. V. 72. P. 237–242. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.103
52. Macchi M., Roda I., Negri E., Fumagalli L. Exploring the role of digital twin for asset lifecycle management // *IFAC-PapersOnLine*. 2018. V. 51. N 11. P. 790–795. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.415
53. Landolfi G., Barni A., Menato S., Cavadini F.A., Rovere D., Dal Maso G. Design of a multi-sided platform supporting CPS deployment in the automation market // *Proc. 1st IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. 2018. P. 684–689. doi: 10.1109/ICPHYS.2018.8390790
54. Bitton R., Gluck T., Stan O., Inokuchi M., Ohta Y., Yamada Y., Yagyu T., Elovici Y., Shabtai A. Deriving a cost-effective digital twin of an ICS to facilitate security evaluation // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2018. V. 11098. P. 533–554. doi: 10.1007/978-3-319-99073-6_26
55. El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies. *IEEE MultiMedia*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 1129–1140. doi: 10.1007/s12652-018-0946-5
49. Schroeder G., Steinmetz C., Pereira C.E., Muller I., Garcia N., Espindola D., Rodrigues R. Visualising the digital twin using web services and augmented reality. *Proc. 14th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2016, pp. 522–527. doi: 10.1109/INDIN.2016.7819217
50. El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies. *IEEE MultiMedia*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 87–92. doi: 10.1109/MMUL.2018.023121167
51. Qi Q., Tao F., Zuo Y., Zhao D. Digital twin service towards smart manufacturing. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 72, pp. 237–242. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.103
52. Macchi M., Roda I., Negri E., Fumagalli L. Exploring the role of digital twin for asset lifecycle management. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 11, pp. 790–795. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.415
53. Landolfi G., Barni A., Menato S., Cavadini F.A., Rovere D., Dal Maso G. Design of a multi-sided platform supporting CPS deployment in the automation market. *Proc. 1st IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, 2018, pp. 684–689. doi: 10.1109/ICPHYS.2018.8390790
54. Bitton R., Gluck T., Stan O., Inokuchi M., Ohta Y., Yamada Y., Yagyu T., Elovici Y., Shabtai A. Deriving a cost-effective digital twin of an ICS to facilitate security evaluation. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2018, vol. 11098, pp. 533–554. doi: 10.1007/978-3-319-99073-6_26

Авторы

Шведенко Владимир Николаевич — доктор технических наук, профессор, ведущий специалист, Всероссийский институт научной и технической информации (ВИНИТИ РАН), Москва, 125190, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-3223-4982, vv_shved@mail.ru

Мозохин Андрей Евгеньевич — кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, Филиал ПАО «МРСК Центра» — «Костромаэнерго», Кострома, 156961, Российская Федерация; доцент, Костромской государственный университет, Кострома, 156005, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-4673-8425, mozokhin@mail.ru

Authors

Vladimir N. Shvedenko — D.Sc., Professor, Leading Researcher, All-Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI RAS), Moscow, 125190, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-3223-4982, vv_shved@mail.ru

Andrey E. Mozokhin — PhD, Deputy Department Head, Branch of Kostromaenergo Rosseti Centre, Kostroma, 156961, Russian Federation; Associate Professor, Kostroma State University, Kostroma, 156005, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-4673-8425, mozokhin@mail.ru