

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ГЕНЕЗИС, СОСТАВ, ТЕРМИНОЛОГИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПЛАТФОРМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ. Часть 3. ПРИКЛАДНЫЕ ПЛАТФОРМЫ, ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ, ПРОГНОЗЫ РАЗВИТИЯ, ВЫЗОВЫ.

В.М. Дозорцев (АО «Хоневелл»)

Рассматриваются практические аспекты создания цифровых двойников (ЦД), прежде всего, применяемых в промышленности. Описываются прикладные платформы, реализующие ключевые элементы киберфизических систем: промышленный Internet вещей, анализ больших данных, коммуникационную и вычислительную инфраструктуру, собственно ЦД. Приводятся многочисленные примеры практического внедрения ЦД в промышленности. Характеризуются текущее состояние и тренды рынка ЦД в мире и в России. Обсуждаются социально-технические вызовы ширящегося распространения ЦД и задачи участников этого революционного этапа трансформации экономики – промышленности, науки, правительственных и финансовых институтов, общества.

Ключевые слова: цифровые двойники, киберфизические системы, прикладные платформы, большие данные, анализ данных, машинное обучение, искусственный интеллект, промышленный Internet вещей, рынок цифровых двойников.

Введение

Цифровые двойники (ЦД) стремительно превратились в ключевой инструмент цифровой трансформации производства, обеспечивая решение целого ряда задач высокотехнологичной автоматизации, хотя их рамки, состав и функциональность до сих пор окончательно не устоялись. В предыдущих частях работы [1, 2] выявлены ключевые характеристики ЦД, прежде всего, их место в киберфизических системах (КФС), круг задач промышленной автоматизации, решаемых с помощью ЦД (часто — на исключительной основе), проанализированы основные технологии, обеспечивающие функционирование двойников: фундаментальное моделирование, моделирование на основе данных, гибридное моделирование, (промышленный) интернет вещей (IoT/IIoT), анализ больших данных, человеко-машинные интерфейсы (включая иммерсивные) и др. Настоящий раздел посвящен практической стороне предмета — уже существующим прикладным платформам КФС (и собственно платформам ЦД) и примерам их промышленного внедрения. Будет проанализирован складывающийся рынок ЦД и тренды его развития, рассмотрены социотехнические перспективы все более широкого распространения ЦД в промышленности.

Цифровые платформы и практические примеры реализации КФС и ЦД

Цифровые двойники бесполезны сами по себе; их назначение — отражать оригинал, то есть физичес-

кий (в более узком плане — промышленный) объект, с целью достижения более надежного и эффективного управления им. Для этого ЦД всегда должны находиться в «горячем» режиме относительно оригинала, непрерывно подпитываясь данными о его реальном состоянии. Частота такой синхронизации и объем необходимых данных могут меняться в зависимости от характера решаемой задачи — от разовой передачи данных при редких изменениях объекта (как в информационном моделировании проектируемых и строящихся сооружений и изделий — BIM/PDM) до раза в минуту (как в задачах управления ТП на базе прогнозирующих моделей [3]) и даже нескольких раз в секунду (в мониторинге состояния ротационного оборудования в предиктивном выявлении аномалий в его работе [4]). Рассмотрим подробнее инструменты, реализующие работу различных составляющих КФС, в рамках специализированных или универсальных платформ.

Платформы больших данных

Многие задачи промышленной автоматизации не могут быть решены без помощи методов машинного обучения (МО), требующих привлечения больших данных об объекте, характеризующихся высоким объемом, разнообразием и скоростью передачи, что требует специального прикладного инструментария. В последние годы появилось множество цифровых платформ больших данных, реализующих смешивание¹, интеграцию, централизованное управление и интерактивный анализ данных. Многие из них позволяют выполнять указанные задачи непосред-

¹ При смешивании большие данные из нескольких источников (различных форматов или даже типов) объединяются в одно хранилище данных.

ственно в месте возникновения данных без их копирования на локальный сервер [5]. Платформы обладают разными характеристиками масштабируемости и простоты использования и основаны на трех основных подходах к обработке данных (пакетный, итеративный пакетный и потоковый). Среди них имеются решения, снабженные графическими пользовательскими интерфейсами и располагающие развитыми библиотеками алгоритмов МО (в том числе глубокого). Принципы управления большими данными исходя из требований ЦД сформулированы и подтверждены практическими примерами в работе [6].

Так, компания *Energis Suisse AG* (Швейцария) предлагает платформу для интеграции и визуализации данных, снабженную библиотекой аналитических инструментов (кластерный и корреляционный анализ, распознавание образов, ассоциативный анализ данных, нейронные сети и предиктивная аналитика). Платформа ориентирована на энергетический сектор, не порождая собственные, но объединяя, сопоставляя и передавая ценность существующим данным. Среди данных, собираемых средствами IoT/IIoT, преобладают исторические, но серьезно представлены и «сырые» измерения. Идеология и архитектура платформы ориентированы на построение ЦД «окружающей среды» (города, района, сооружений, населения, энергосетей, потребления электроэнергии, трансформаторных подстанций, пунктов заправки электромобилей, погоду и пр.). *Energis* закупает данные об общинах, землевладениях, потреблении электроэнергии и самих потребителей. Используются также цифровые изображения, например, опор электропередачи, для автоматического определения их состояния и необходимости ремонта. Платформа обеспечивает проверку качества данных, при этом функции сбора и интеграции отделены от аналитических инструментов, поддерживающих принятие решений по генерации электроэнергии и загрузке электросетей, управлению активами и распределением электроэнергии, по рыночным коммуникациям и даже лоббированию клиентами «энергетической революции». Множество клиентов *Energis* достигают с помощью описанного решения экономии электроэнергии за счет умной изоляции зданий, интеллектуализации учета энергии, оптимального развертывания энергоемких элементов производства (например, конвейерных линий).

Платформы Internet вещей

Высокоскоростной Wi-Fi Internet, дешевые датчики, алгоритмы МО, эффективные методы анализа в режиме реального времени повысили потенциальную ценность данных, порождаемых объектами управления. Доступ к этим данным обеспечивают технологии IoT/IIoT, поэтому не случайно появление в последние годы инновационных IoT-платформ для различных целей [7]. Рассмотрим ключевые особенности некоторых из них.

Платформа *Amazon Web Services* использует, в частности, эластичные вычисления, распределен-

ные между компьютерами и облаком. Это позволяет наращивать и высвобождать ресурсы процессоров, памяти и хранения без необходимости планировать загрузку, обрабатывать пиковые нагрузки, обслуживать дополнительные ресурсы и оборудование. Платформа успешно применяется в экологических приложениях, в частности, для мониторинга и моделирования окружающей среды [8]. Она удобно интегрируется с беспроводными сенсорными сетями, состоящими из множества датчиков и исполнительных механизмов, объединенных посредством радиоканала. Такие самоорганизующиеся сети востребованы для выявления отказов оборудования по показаниям вибрации, температуры, давления и пр.; инспекции и техобслуживания промышленных объектов; обеспечения энерго- и ресурсосбережения.

Платформа *Azure IoT Suite* (корпорация Microsoft) предоставляет конечным пользователям возможность связываться со своими сервисами IoT и устройствами, обменивающимися данными и обрабатывающими их удобным способом. Существует множество надстроек над Azure, например, объединение Azure IIoT с открытой заводской сетью универсальной архитектуры (OPC UA) для управления промышленными объектами. В работе [9] рассмотрен пример такого внедрения с 1500 датчиками, 600 из которых обновляют свои значения раз в секунду. Другой пример — система *FarmBeats* для сельскохозяйственных приложений [10], в которой используется базовая станция IoT на солнечных батареях и интеллектуальный шлюз, обеспечивающий доступ к услугам в облаке (планирование энергосберегающих маршрутов дрона, осуществляющего мониторинг растений, животных и хранящихся продуктов).

Платформа *Bosch IIoT Suite* предоставляет не только облачные сервисы, но и доступ к локальным данным [11]. Примеры интеграции этих решений в производственные бизнес-процессы (в том числе в системы межмашинного взаимодействия) приведены в работе [12]. Платформа имеет единый интерфейс для управления цифровым двойником, располагающимся в облаке и абстрагированным от конкретных особенностей оригинала. Так, например, происходит управление грузовиками, снабженными датчиками геолокации, причем смежные системы, заинтересованные в этой информации, могут получать соответствующие обновления по подписке.

Платформа *Cisco Nexus* от компании Cisco, одного из пионеров IoT, используется для управления центрами обработки данных на основе туманных вычислений в энергетике, нефтегазовой промышленности, коммунальных службах, на транспорте, в горнодобывающей промышленности [13]. Та же платформа используется для мониторинга состояния здоровья людей в умных домах [14], где задержка в передаче данных в облако и обратно неприемлема. Применяемая здесь концепция туманных вычислений в интеллектуальном шлюзе предполагает встроенный ана-

лиз данных, вычисление индекса здоровья на основе распознаваемых событий, распределенное хранение данных и службу уведомлений на границе сети.

Платформа *Google App Engine* используется при разработке технологий умного дома, в которых с минимумом вмешательств пользователя контролируются условия эксплуатации (влажность воздуха, температура, освещение) и определяются необходимые работы по поддержанию дома [15]. В этом подходе технологии IoT сочетаются с Web-сервисами и облачными вычислениями.

Облачная IoT-платформа *IBM BlueMix Cloud* успешно применяется для отслеживания активности автомобиля, информирования владельцев и сервисных служб о плановом техническом обслуживании, предоставления информации для эффективного вождения (расход топлива, выбросы выхлопных газов) [16].

IoT-платформа Oracle — это облачный сервис на основе принципа Platform-as-a-Service (PaaS). Платформа используется для мониторинга и обслуживания автомобилей, оптимизации маршрутов транспортных средств и грузоперевозок, мониторинга рабочих мест на производстве [17]. Укажем также на формирование рекомендаций по месту проведения мероприятий на основе анализа адреса и географического положения пользователя, погодных и транспортных условий, стоимости, уровня обслуживания и удаленности объектов, отзывов пользователей в социальных сетях.

В платформе *Salesforce* осуществлен принцип Software-as-a-Service (SaaS), то есть пользователи получают доступ к программному обеспечению, размещенному поставщиками, через личные Web-браузеры. Salesforce обеспечивает масштабируемость, эффективное управление и обслуживание, снижение затрат на ресурсы. Близкие к реальному времени приложения охватывают ветряные турбины, автоматически настраивающие свои параметры на основе «живых» погодных данных; системы децентрализованного распределения электроэнергии с использованием пограничных вычислений, программно-определяемых сетей и блокчейна [18]; системы управления взаимоотношениями с клиентами (Customer Relationship Management, CRM) [19] и др.

Облачная платформа корпорации SAP успешно внедрена в интеллектуальных ирригационных системах для гибкого орошения и эффективного использования избыточной воды (ливни, грунтовые воды) [20]. Система *EcoLogic* предназначена для мониторинга транспортных средств в режиме реального времени (выбросы углекислого газа, управление мощностью, интеллектуальные уведомления собственников и технических служб) [21]. Система включает аппаратный модуль для сбора данных и облачное приложение для обработки, анализа и визуализации данных. *EcoLogic* легко масштабируется, поддерживает работу с разны-

ми транспортными средствами и разными датчиками их состояния, совместима с другими облачными платформами, интегрируется со сторонними приложениями и сервисами (льготный транспортный налог, торговля выбросами, управление светофорами, умный город).

Коммуникационная инфраструктура

Быстрая передача данных крайне важна для работы любого ЦД. Современные коммуникационные технологии, такие как 4G, могут в этом случае столкнуться с серьезными коммуникационными проблемами, если все больше устройств будут обмениваться данными в ограниченном радиочастотном спектре. Технология 5G с широким диапазоном частот способна обслуживать гораздо больше устройств, но нуждается в гораздо более высокочастотном спектре (30...300 ГГц), чем обычные мобильные сети. Но такие миллиметровые волны не могут легко проникать сквозь препятствия, что потребует больше миниатюрных базовых станций, покрывающих всю необходимую область. Другая опция — использование беспилотных летательных аппаратов для помощи базовым станциям не только в случае многоярусных общественных мероприятий и стихийных бедствий, но и в промышленных применениях [22].

Последний отчет Ассоциации GSM² по внедрению технологии 5G в Китае [23] содержит традиционные для 5G кейсы — аэросъемка, поддержка водителей, мониторинг транспортных средств, сети электроснабжения, игровые платформы, здравоохранение, демонстрационные и образовательные системы на базе виртуальной реальности. Однако несколько примеров прямо относятся к промышленности: сборка стиральных машин, производство полиэстера и полиэфирных нитей, производство бетонных машин. Особо отметим мобильную сеть 5G на Сянтаньском металлургическом комбинате (Xiangtan). Проект реализован совместно компаниями China Mobile и Huawei и на первом этапе затронул управление кранами, роботизированными манипуляторами и видеонаблюдение высокой четкости в зонах повышенного риска (высокие температуры и давления, токсичные газы). На комбинате 400 кранов, управляемых 1,5 тыс. операторов (из них 120 кранов работают в круглосуточном режиме и на них заняты 480 операторов). После полной автоматизации работы кранов на базе мобильной связи пятого поколения ожидается повышение эффективности производства на 20%. За счет перевода 20 кранов в полностью автономный круглосуточный режим их производительность возрастет на 25%; еще 100 кранов перейдут в полуавтоматический дистанционный режим, причем один оператор сможет управлять тремя кранами одновременно. Наиболее впечатляющий результат принесло видеонаблюдение в опасных производственных зонах. В этом случае Wi-Fi решение недостаточно стабильно, не за-

² Ассоциация GSM (GSMA) представляет интересы своих членов — операторов мобильной связи по всему миру (всего около 1200 компаний).

щищено от помех и не обладает необходимой пропускной способностью, а сверхширокополосная 5G связь позволяет восьмиканальную потоковую передачу HD-видео. Ожидается, что эффективность работы смен на этих переделах вырастет вдвое.

Вычислительная инфраструктура

Производительность и функциональность процессоров удваивается каждые два года (закон Мура), но вычисления все усложняются, число обрабатываемых объектов растет опережающими темпами. Скорость существующих процессоров, уже приближающихся к атомарному пределу миниатюризации, может стать серьезным ограничением для новых вычислительных систем, если только нас не ожидает новая транзисторная революция. Это прямо затрагивает ЦД, использующие вычислительно высокозатратные языки программирования (Matlab, R, Python, Julia).

Преодоление этих ограничений связано с граничными вычислениями (в пределах досягаемости конечных устройств), сокращающими время сетевого отклика и нагрузку на пропускную способность сети, и с туманными вычислениями [24], распределенными между облачными дата-центрами, конечными устройствами и другими элементами инфраструктуры данных (при этом вычислительная нагрузка распределяется автоматически). В контексте ЦД можно указать на применение такого подхода к задаче энергоменеджмента [25]. На уровне микрогридов³ (в том числе для жилых домов и других сооружений) число подключаемых устройств (датчиков, приводов, пр.) сильно возрастает, что требует все больших вычислительных мощностей и затрудняет возможности масштабирования. Туманные вычисления обеспечивают таким системам необходимую гибкость, интероперабельность, связность и конфиденциальность данных в режиме реального времени.

Как и во многих инновационных областях, большие надежды в направлении ЦД возлагаются на квантовые вычисления, которые могут открыть феноменальные возможности для решения сложных датоемких задач (коммуникационные сети, искусственный интеллект).

Платформы ЦД

В последние годы продукты на основе ЦД начали предлагать компании, специализирующиеся на IT-решениях для промышленности (IBM, Oracle, SAP) [26], промышленные гиганты (Siemens, General Electric, Boeing, Airbus, др.) и мировые поставщики решений для промышленной автоматизации (Honeywell, AspenTech, Schneider). Ниже приведен краткий обзор некоторых ЦД-платформ, уже присутствующих на рынке.

Компания Akseos предоставляет облачную ЦД-платформу на основе структурного анализа данных для повышения производительности активов, оптимизации работы и продления срока службы оборудо-

вания, прогнозирования и предотвращения отказов, планирования действий в непредвиденных ситуациях. Компания Royal Dutch Shell использует решение Akseos для продления срока службы оффшорных активов, оптимизации морской добычи, хранения и отгрузки углеводородов в Северном море [27].

Базовая концепция ЦД компании ANSYS предполагает объединение технологий IoT и компьютерного моделирования на основе данных, дополненного фундаментальным мультифизическим моделированием [28]. Платформа *Digital Twin Builder* снабжена инструментами построения моделей пониженной размерности (так называемых суррогатных моделей) и обеспечивает встроенную интеграцию программного обеспечения сторонних производителей. На указанной платформе построены ЦД насосов для повышения производительности и прогнозирования отказов [29]. Компания General Electric (GE) использует специальную версию указанной платформы для проектирования электрооборудования мега-ваттной мощности [30].

Компания Cognite ориентирована на полномасштабную цифровую трансформацию в тяжелой промышленности — нефтегаз, энергетика, морские перевозки, производство оригинального оборудования (OEM) [31]. Программный пакет *Cognite Data Fusion* включают пользовательские интерфейсы, наборы средств разработки и библиотеки, открытые для конечных пользователей. Разрабатываемые на платформе приложения и алгоритмы МО могут использовать большие модели САПР, сложные схемы активов, но при этом запускаются на телефонах и планшетах пользователей. На базе ЦД-решения Cognite компания Framo (OEM для систем перекачки углеводородов) и ее клиент Aker BP реализовали эффективный обмен оперативными данными о работе оборудования в реальном времени, обеспечивающий контроль состояния оборудования и планирование технического обслуживания [32]. Интеграция платформы с системой управления информацией компании Siemens позволила оптимизировать техническое обслуживание на шельфе за счет анализа состояния оборудования с помощью алгоритмов МО [33].

Компания Dassault Systèmes связывает назначение ЦД с модельно-ориентированным системным инжинирингом [34]. ЦД-платформа *3DEXPERIENCE* представляет собой инструмент проектирования и моделирования (в том числе на стадии разработки — проверки концепции, виртуальных испытаний и виртуальной эксплуатации); междисциплинарного взаимодействия пользователей; управления инженерной информацией внутри предприятия и от поставщиков. Платформа открыта для интеграции с различными программами и стандартами.

Корпорация GE разрабатывает ЦД, интегрированные с компонентами силовых установок, с уче-

³ Микрогриды — локальные энергосети, обладающие собственными источниками генерации энергии и способные удовлетворить потребительский спрос при максимуме пиковых нагрузок. Они повышают надежность поставок электроэнергии и снижают затраты потребителей.

том определенных заказчиком ключевых показателей эффективности (КПЭ) и бизнес-целей по состоянию активов, износу и производительности оборудования. ЦД функционируют на платформе *GE Predix™*, предназначенной для работы с данными промышленных объемов, создания и оперативного изменения сложных цифровых моделей. ЦД доступны пользователям на основе PaaS и, согласно принципиальному подходу GE, охватывают модель объекта, аналитические инструменты и базы знаний о функционировании объекта от ранних стадий проектирования до текущей эксплуатации, включая информацию о ремонтах и техобслуживании [35]. Такой подход близок к пониманию ЦД как «цифровой нити» [1]. Решения на платформе *GE Predix™* неоднократно опробованы в управлении распределительными сетями, в грид-аналитике и управлении эффективностью активов энергетических и коммунальных служб. Многие компании используют эти решения в автомобильной, химической, целлюлозно-бумажной промышленности, энергетике, металлургии, промышленности полупроводников, общепите [36].

Примером платформы промышленных ЦД от производителя средств высокотехнологичной автоматизации является система *Honeywell Forge for Industrial* — программное решение, основанное на анализе производственных данных в реальном времени и интеллектуальной визуализации состояния процессов, активов и работников. В основе подхода Honeywell лежит идея «подключенности» объектов к их ЦД, возвращенным в любой облачной среде или среде центра обработки данных.

На сегодня сервис «Подключенный процесс» поддерживает установки нефтепереработки, нефтехимии и газопереработки, работающие по технологии компании Honeywell UOP; в скором будущем планируется расширить поддержку на установки других лицензиаров, производителей оборудования и диагностических систем (SKF, Flowserve, Dover). В качестве аналитической платформы используется собственное решение *Uniformance Asset Sentinel*, расположенное в облаке Honeywell и связанное по защищенному каналу с технологическим объектом. Перед передачей данные структурируются и верифицируются, затем в облаке происходит дальнейшая обработка с помощью моделей ЦД. Для каждого типа установок рассчитывается около 200 специальных КПЭ и симптомов, разработанных экспертами технологического лицензиара (Honeywell UOP). Результаты расчетов в круглосуточном режиме доступны на защищенном портале Honeywell эксплуатационному персоналу и техническим специалистам предприятия, а также экспертам UOP. При выявлении признаков неэффективной работы или потенциальных угроз безопасности и эксплуатационной готовности установки эксперты UOP связываются с дежурными специалистами предприятия с предложениями по предупреждению нештатных ситуаций. На примере установки

дегидрирования пропана/бутана UOP OleFlex производительностью 510 тыс. т/год описанный сервис, по оценке экспертов, позволяет ежегодно получать дополнительную прибыль в размере 3,4 млн. долл. США за счет оптимизации выходов продуктов, переработки оптимальной смеси сырья, снижения энергопотребления, увеличения срока службы катализатора, сравнительного анализа с рабочими показателями лучших в своем классе однотипных производств [37]. Среди пользователей сервиса — НПЗ Tyler (Техас, США), производство пропилена на заводе Jubail (Саудовская Аравия), НПЗ Quang Ngai (Вьетнам) и др.

Сервис «Подключенное оборудование» основан на том же аналитическом решении *Asset Sentinel*. При этом моделирование и прогнозирование работы оборудования проводится как средствами самой платформы, так и на внешних специализированных инструментах, таких как системы высокоточных технологических расчетов, программы статистического анализа и прогнозирования (*Seeq, MathWorks, Weibull Analysis*), программы для анализа рисков и др. Дополненная алгоритмами МО и другими инструментами искусственного интеллекта, платформа позволяет реализовать предиктивную аналитику работы сложного дорогостоящего оборудования [4]. Результаты такой аналитики используются для раннего выявления отклонений, а в некоторых случаях даже для определения их причин. Это решает важнейшую задачу перехода от низкоэффективного планово-предупредительного ремонта оборудования к ремонту по его текущему состоянию. Выявляемые с помощью ЦД отклонения могут инициировать автоматизированные процессы управления и запускать заранее сконфигурированные и хранимые в системе *Asset Sentinel* процедуры (например, уведомление персонала и других цифровых сервисов). Описанный подход уже нашел применение в промышленных компаниях для построения систем технического обслуживания и ремонта оборудования: платформа *Asset Sentinel* используется в компаниях BP, Adnoc, Saudi Aramco, Reliance, ЛУКОЙЛ и др.

Компания *Kongsberg Digital* — поставщик PaaS и SaaS решений для энергетической, нефтегазовой отраслей и морских перевозок, партнер ключевых поставщиков облачных услуг, в том числе Microsoft Azure. В 2017 г. *Kongsberg* запустил открытую для клиентов, партнеров и поставщиков эко-платформу *KognifAI*, снабженную рядом облачных приложений, ориентированных на обработку данных и обеспечивающих их безопасность и целостность [38]. На платформе *KognifAI* предложены ЦД-решения для морского бурения и обслуживания скважин, для возобновляемых источников энергии [39], проектирования строящихся промышленных установок [40], технического обслуживания и ремонта оборудования на оффшорных платформах и на берегу [41].

В 2018 г. компания *MapleSim* выпустила продукт *MapleSoft* для построения ЦД промышленных машин

на основе данных САПР [42]. MapleSoft реализует виртуальное прототипирование⁴ и виртуальный ввод в эксплуатацию технологических объектов, раннее выявление проблем, оптимизацию параметров и расчетный анализ проектируемых машин.

Решение *Oracle IoT Cloud* построено на трех базовых компонентах: (1) ЦД в облаке, (2) прогностические ЦД на основе физических моделей или моделей МО и (3) проекция ЦД на конечные приложения от Oracle, такие как ERP (цепочка поставок, производство, техническое обслуживание) и сервисное обслуживание [43].

Корпорация Siemens предлагает разнообразные ЦД-инструменты для инжиниринговых расчетов, САПР, управления производством, цифрового проектирования [44]. Для Siemens ЦД — это, прежде всего, виртуальная модель объекта (продукта или производственной единицы), отражающая все изменения в объекте в течение его жизненного цикла. Благодаря этому ЦД могут быть использованы как инструмент валидации и верификации сложных продуктов и систем, начиная со стадии их разработки (та же идея «цифровой» нити), что облегчает оптимизацию продукта, повышает оперативность пусконаладочных работ, ускоряет переналадку, обеспечивает бесперебойную работу активов [45]. Платформа *Simcenter Amesim* для создания ЦД мехатронных систем разной природы снабжена богатой библиотекой из 4500 валидированных моделей различных компонентов, позволяющих оптимизацию систем, начиная с функциональных требований к проектируемому изделию [46]. Платформы ЦД от Siemens использовались для моделирования производственной линии изготовления пневматических автомобильных цилиндров, а затем для построения ее двойника [47]. ЦД от Siemens на основе инструментов МО применялись также для построения умной фабрики [48].

Практические примеры ЦД и ключевые обзорные статьи (публикации 2019–20 гг.)

Интерес к ЦД приобрел взрывной характер. Первая статья на эту тему была единственной опубликованной в 2005 г.; еще в 2015 г. их было всего две, а в 2016 г. — пять. В 2019 г. было опубликовано 397 статей, в 2020 г. — 280 (подсчет еще не завершен). Приведем примеры обнародованных за последние два года внедрений ЦД в промышленности:

- для производства углеводородного волокна [49] и металлических добавок [50] для 3D-печати;
- для производства пустотелого стекла [51];
- для шасси транспортных средств [52];
- для скважного бурения [53] (позволяет прогнозировать наступление наиболее критического отказа — дисбаланса в оси бурения);
- для сборки грузовиков компании Skoda Machine Tool Co. [54];

⁴ Прототипирование — распространенная в машино- и приборостроении «черновая» реализация базовой функциональности продукта для анализа работы проектируемой системы в целом.

- для сетей распределения питьевой воды [55];
- для описания производственных активов на этапе проектирования и строительства [56];
- для оптимизации работы внутреннего автопарка продукции [57];
- для управления селективным плавлением металла (аддитивный синтез на подложке) с целью предупреждения локальных перегревов [58];
- в испытательном стенде КФС холодной гибки листового металла [59];
- для диагностики испытаний авиационного двигателя [60];
- для электрической подстанции [61]: мониторинг и ориентирование персонала на местности с помощью технологии сверхширокополосного сигнала, поддержка процедур эксплуатации и обслуживания оборудования в режиме управления заданиями, мониторинг производственных данных в реальном времени, раннее предупреждение и быстрое реагирование в чрезвычайных ситуациях.

В последние месяцы опубликовано также несколько важных обзоров и концептуальных работ по теме ЦД. В работе [62] прослеживается эволюция определений понятия ЦД от первоначальной концепции в аэрокосмической области до последних интерпретаций в контексте Industry 4.0 и интеллектуального производства; приводится определение ЦД в рамках европейского проекта H2020 MAYA, нацеленного на разработку методологии моделирования и междисциплинарных инструментов для проектирования, инжиниринга и управления предприятиями на основе КФС. Определения ЦД анализируются и в работе [63]. Авторы публикации [64] приводят определения киберфизического продукта, его цифровой модели, аватара, цифровой тени и цифрового потока и обсуждают их взаимосвязь как основных строительных блоков среды управления жизненным циклом КФС. В работе [65] исследуются возможности современных ЦД-платформ с открытым исходным кодом, реализующих сбор данных в реальном времени, их аналитику и визуализацию. Производительность КФС-архитектуры с открытым исходным кодом демонстрируется на сценарии использования открытых отраслевых данных. В работе [66] проведен сравнительный качественный и количественный анализ реконфигурации производственной КФС двумя методами — с/без применения ЦД, а авторы работы [67] сравнивают различные ЦД-платформы.

Осознание необходимости стандартизации ЦД отражается в попытках построения универсальной структуры двойников, в том числе для промышленности [68–70].

Наконец, в работе [71] предлагается новая онтология ЦД, а в исследовании [72] предпринимается попытка построения общей теории ЦД. Авторы работы [73] исследуют концепцию ЦД, учитывающую чело-

веческий фактор, а в обзорах [74, 75] рассматриваются приложения ЦД в контексте имитационного моделирования и искусственного интеллекта.

Рынок ЦД — текущее состояние и прогнозы

Оценить объем и динамику рынка цифровых двойников непросто из-за разнобоя в их трактовке, сложности отделения работы собственно по созданию ЦД от смежного программного обеспечения и инжиниринга [76]. Оценки глобального годового объема продаж ЦД (в промышленности, здравоохранении, розничной торговле, производстве потребительских товаров) в разных исследованиях колеблются в пределах 3–4 млрд. долл. США. Прогноз на ближайший период (3...5 лет) постоянно корректируется в большую сторону: от 26,1 млрд. долл. США в 2025 г. при среднегодовом росте в 38,2% [77] до 48,2 млрд. долл. США в 2026 г. при среднегодовом росте в 42,5% [78]. Столь беспрецедентный рост объясняют тотальным распространением современных датчиков и систем сбора данных, развитием методов МО и искусственного интеллекта. Наиболее быстрорастущий и доходный сегмент — промышленное производство (уже к 2023 г. на него будет приходиться треть рынка).

По имеющимся прогнозам, к 2024 г. половина из 2000 крупнейших публичных компаний мира будут располагать ЦД и их экосистемами. Консалтинговая компания Gartner ожидает, что половина крупнейших промышленных предприятий уже в 2021 г. увеличат свою эффективность на 10% вследствие использования ЦД [79]. В целом в течение следующих 5 лет рынок ЦД будет прирастать на треть в год.

Основные мировые игроки, большая часть которых упомянута в предыдущем разделе, располагаются в США, Германии, Франции, Японии. Однако Китай занимает особое место, превратившись в крупнейший рынок внедрений ЦД-решений. Исследовательская активность Китая в области ЦД вообще беспрецедентна: он лидирует по числу публикаций (120 работ), обойдя Германию (116) и США (113)⁵. Львиная доля исследователей в области ЦД — китайские ученые, работающие на родине или в научных организациях по всему миру. По числу спонсорских инициатив лидирует Национальный фонд естественных наук Китая (53 проекта) против 20 у Рамочной Программы ЕС по развитию научных исследований и разработок; еще 12 спонсорских проектов принадлежат Национальному фонду фундаментальных исследований Китая.

Российский рынок ЦД только складывается; его текущий объем вряд ли превышает 200 млн. долл. США, а потенциал связывается, прежде всего, с наличием ключевых компетенций в области моделирования и IT-технологий. В опросе [80] эксперты крупнейших российских компаний, исследовательских и прикладных организаций ожидают прихода в Россию бума ЦД, но с отставанием от мировых

аналогов на 5...10 лет. Те же респонденты ставят ЦД на третье место среди наиболее востребованных производственных технологий (10,5% против 14,1% у моделирования и компьютерного инжиниринга и 11,1% у систем управления жизненным циклом продукции). В списке же пяти наиболее прорывных технологий у ЦД второе место: их выбрали 52% опрошенных (сразу после математического моделирования, компьютерного инжиниринга и имитационного моделирования — 62%).

Отечественные ЦД-решения активно появляются на рынке; некоторые из них базируются на мировых продуктах, другие — собственно российские разработки. В лидерах пользователей ЦД — автомобилестроение, машиностроение, авиастроение, нефтегазовая промышленность, энергетика. Среди разработчиков такие компании-гиганты, как РЖД, Росатом, Ростех, Газпром-нефть.

Ключевая проблема, осознаваемая всеми опрошенными экспертами, — функциональная совместимость отечественных и зарубежных решений. Это необходимо, чтобы российские продукты могли проникнуть на мировой рынок и, что еще важнее, работать в экосистеме уже внедренных решений зарубежных производителей. Отметим, что стандартизация ЦД — по-видимому, наиболее активно обсуждаемая тема [68–70].

Очевидно, что развитие столь сложного и важного направления невозможно или очень затруднено без государственной поддержки. Это хорошо понимается ведущими экономическими державами и союзами. В США это осуществляется через консорциумы, объединяющие университеты, промышленные компании, региональные и федеральные органы власти [81]. Консорциумы имеют статус государственно-частного партнерства, их финансирование осуществляется за счет федерального бюджета и средств участников партнерства. В Великобритании развитие ЦД поддерживается в рамках так называемых Инновационных центров-катаapult [82], организующих сотрудничество компаний и университетов, а также представляющих доступ разработчиков к оборудованию, инструментам для экспериментов и испытаний за счет государственных источников и частных инвестиций. В ЕС принят механизм финансирования работ по ЦД в рамках программы грантов через сеть организаций, обеспечивающих проведение конкурсов, хакатонов, профессиональных курсов для технических специалистов и руководителей компаний, создающих инкубаторы, предоставляющих промышленные объекты и «учебные» фабрики для экспериментов и испытаний новых решений [83].

В России ЦД включены в национальную Дорожную карту развития «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии» [84] в качестве необходимого элемента и субтехнологии, реали-

⁵ Россия выглядит в этом списке вполне достойно (57 работ) — на уровне Великобритании и впереди Индии и Франции.

зубом отечественными производителями на основе грантов (определены даже сроки таких разработок). Важнейший элемент программы — создание национального Digital Brainware, то есть, в применении к технологическим отраслям промышленности, разработка и валидация высокоточных математических моделей физико-механических, химических, технологических и производственных процессов. По-видимому, эффективность различных национальных программ будет определяться даже не столько компетенциями разработчиков и объемом инвестиций (хотя это весьма важно), но доступностью и прозрачностью государственной поддержки, как и общим инновационным климатом в экономике.

Социально-технические вызовы ЦД

Включению человека в парадигму киберфизических систем нет альтернативы; в перспективе это приведет к появлению кибер-физико-социальных систем [85]. Но, как результат, появятся новые вызовы: мотивационные, когнитивные, эргономические и даже социальные.

Цифровые двойники задают новый качественный уровень автоматизации управления физическими активами, но их адаптация (как и в случае других технологий автоматизации) будет определяться приемлемостью новых инструментов для работников. Страх потерять работу в связи с засильем автоматизации, конечно, небеспокоен и всегда обострялся при появлении новых инструментов автоматизации. Распространение ЦД породило очередную «страшилку»: все производство переедет в темные китайские подземелья, где роботы и ЦД будут работать вместо людей. К счастью, со времен луддитов пессимистические прогнозы о вытеснении людей автоматикой на всех этапах научно-технического прогресса постепенно сменялись пониманием необходимости правильного распределения работы между машиной и человеком. (Конечно, под риском всегда оставались низко квалифицированные позиции [86].)

Тщательное распределение задач между людьми и машинами обеспечит гораздо большую безопасность и креативность на рабочем месте, освобождая так называемые 3d-рабочие места (dirty, dull, dangerous — грязные, тупые и опасные) для машин и искусственного интеллекта. Но при этом работники должны иметь возможность понимать и интерпретировать работу ЦД, какими бы мудреными алгоритмами МО и искусственного интеллекта она ни определялась. Эта проблема обсуждалась во второй части работы [2] при рассмотрении гибридных моделей ЦД, в которых «физика» дополняет данные, заодно проверяя модели «черного ящика» на разумность.

Другой не менее важный вызов: по мере того, как автоматизация займется рутинными работами, роль людей в решении сложных задач станет еще более критичной. Здесь уместно говорить об «иронии» автоматизации, которая, по определению Л. Бейнбридж [87],

заключается в том, что все более сложные и совершенные системы автоматизации не упрощают, а усложняют работу человека и увеличивает риски, поскольку становятся менее прозрачными и требуют повышенного внимания. Как сохранить «боеготовность» человека после длительных фаз бездействия, как выработать стресс-защищенный навык эффективной и безопасной деятельности? Бурное развитие КФС и ЦД, по крайней мере, на первых порах, увеличит долю пользователей, неподготовленных к новым методам работы. Здесь первостепенной остается роль компьютерного тренинга, только благодаря которому можно разорвать порочную спираль «иронии автоматизации» [88].

Наконец, по мере победного наступления цифрового мира необходимы будут все большие усилия для обеспечения возможности участвовать в новой жизни всем, а не только немногим избранным. Лишь тогда новые технологии действительно повысят качество рабочих мест, а при правильной подготовке и профессиональный рост работников, и возможность сосредоточиться на более творческой работе.

Выводы. Задачи развития ЦД

По оценке [89], Industry 4.0 обеспечит рост производительности труда в мировой экономике больше, чем на треть. Значительный вклад в это внесут ЦД, все шире проникающие во все сферы экономики, а в последнее время и в промышленность.

Но, несмотря на беспрецедентную активность исследователей (практически каждый день появляется новая работа по ЦД), еще не все существенные положения прояснены. Нет единого мнения о том, что такое ЦД, отчасти потому, что их проявления очень разнообразны. (Появилась даже «квантовая» теория ЦД [90], согласно которой двойники распределены в КФС подобно частицам в квантовой механике). Об этом разнообразии говорит и предпринятый нами анализ метафоры двойничества, довольно плотно накладывающийся на задачи ЦД в технических системах [1].

Отсутствие целостного понимания состава и границ ЦД логично перетекает в неразбериху определений, которые часто сводятся к отражению отдельных или подмножества конкретных функций двойников. Не помогает и попытка определить ЦД через то, чем они не являются. Авторы работы [91] полагают, что степень сходства ЦД с его физическим оригиналом по внешнему виду и по поведению (конечно, важнее именно поведение) можно оценить количественно, скажем, в шкале от 1 до 10, где оценка 10 будет показывать, что ЦД и оригинал становятся неотличимыми для наблюдателя. Низкие же оценки отсеют настоящие ЦД от настоящих. Мы видели, однако, что репертуар ЦД значительно шире такого подхода: двойник может быть сильным упрощением оригинала, не полностью совпадать с физическим объектом по наблюдаемым параметрам или режимам и пр. Эти смысловые и терминологические сложности абсолютно нормальны для бурно развивающегося, но все еще складывающегося

направления исследований. Более того, в постнеклассической научной парадигме практические успехи смогут повлиять на теоретическое осмысление сущности, функциональности и границ ЦД [92].

В наиболее представительном на сегодня обзоре [91] обсуждаются общие рекомендации по развитию ЦД силами всех заинтересованных сторон. Применительно к промышленным ЦД они вкратце могут быть представлены так:

- у промышленности имеется огромный задел данных для валидации моделей, практические знания персонала, возможность интеграции ЦД в промышленные бизнес-решения;
- наука может создавать ЦД-решения с открытым кодом и готовить компетентные кадры для их разработки, внедрения и сопровождения (на первых порах это, как всегда, будет синтез точной науки и интуитивного «искусства», что не может быть полностью передано практикам);
- правительства (на всех уровнях) должны обеспечить политику демократизации технологии (безопасный и широкий доступ), открывать для пользователей общественно значимые приложения, продвигать отраслевые программы;
- финансовые институты должны инвестировать в платформы с открытым кодом (пока это не наблюдается в необходимом объеме);
- обществу необходимо принять ответственность за собственную осведомленность (самообучение) в области ЦД и сформировать позитивное восприятие соответствующих социальных перемен.

Завершим содержательным, хоть и не чисто техническим толкованием: цифровые двойники — незаметный способ с помощью виртуальных инструментов изучать и прогнозировать неизвестный мир и на этой основе оптимизировать его [92].

Список литературы

1. Дозорцев В.М. Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. Ч. 1. Возникновение и становление цифровых двойников. Как существующие определения отражают содержание и функции цифровых двойников? // Автоматизация в промышленности. 2020. № 9. С. 3-11.
2. Дозорцев В.М. Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. Ч. 2. Ключевые технологии цифровых двойников. Типы моделирования физического объекта // Автоматизация в промышленности. 2020. № 11. С. 3-10.
3. Дозорцев В.М., Ицкович Э.Л., Кнеллер Д.В. Усовершенствованное управление технологическими процессами (АРС): 10 лет в России // Автоматизация в промышленности. 2013. № 1. С. 12-19.
4. Владов Р.А., Дозорцев В.М., Шайдуллин Р.А., Белоусов О.Ю. Предиктивная аналитика состояния оборудования в химико-технологических процессах // Автоматизация в промышленности. 2019. № 12. С. 44-52.
5. Landset S. et al. A survey of open source tools for machine learning with big data in the Hadoop ecosystem // Journal of Big Data. 2015. vol. 2(24).
6. Kaufmann M. Big data management canvas: A reference model for value creation from data // Big Data and Cognitive Computing, 2019, vol. 3(19).
7. Ray P.P. A survey of IoT cloud platforms // Future Computing and Informatics Journal, 2016, vol. 1, no. 1-2, pp. 35-46.
8. Lee K. et al. Extending sensor networks into the cloud using amazon web services // In: 2010 IEEE International Conference on Networked Embedded Systems for Enterprise Applications, 2010, pp. 1-7.
9. Forsström S., Jennehag U. A performance and cost evaluation of combining OPC-UA and Microsoft Azure IoT Hub into an industrial Internet-of-Things system // In: 2017 Global Internet of Things Summit (GIoTS). IEEE, 2017, pp. 1-6.
10. Vasisht D. et al. FarmBeats: An IoT platform for data-driven agriculture // In: 14th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 17), 2017, pp. 515-529.
11. Sweetina J. et al. Toward a standardized common M2M service layer platform: Introduction to oneM2M // IEEE Wireless Communications, 2014, vol. 21, no. 3, pp. 20-26.
12. Friedow C. et al. Integrating IoT devices into business processes // In: International Conference on Advanced Information Systems Engineering. Springer, 2018, pp. 265-277.
13. Okafor K.C. et al. Leveraging fog computing for scalable IoT datacenter using spine-leaf network topology // Journal of Electrical and Computer Engineering, 2017.
14. Verma P., Sood S.K. Fog assisted-IoT enabled patient health monitoring in smart homes // IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 3, pp. 1789-1796, 2018.
15. Soliman M. et al. Smart home: Integrating internet of things with web services and cloud computing // In: 5th IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science, 2013, vol. 2, pp. 317-320.
16. Husni E. et al. Applied Internet of Things (IoT): car monitoring system using IBM BlueMix // In: IEEE International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications, 2016, pp. 417-422.
17. Margaris D., Vassilakis C. Exploiting Internet of Things information to enhance venues' recommendation accuracy // Service Oriented Computing and Applications, 2017, vol. 11, no. 4, pp. 393-409.
18. Li Z. et al. Cyber-secure decentralized energy management for IoT-enabled active distribution networks // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, vol. 6, no. 5, pp. 900-917.
19. Manchar A., Chouhan A. Salesforce CRM: A new way of managing customer relationship in cloud environment // In: 2nd International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 2017, pp. 1-4.
20. Koduru S. et al. Smart irrigation system using cloud and internet of things // In: 2nd International Conference on Communication, Computing and Networking, 2019, pp. 195-203.
21. Tsokov T., Petrova-Antonova D. EcoLogic: IoT platform for control of carbon emissions // In: 12th International Conference on Software Technologies, 2017, vol. 1, pp. 178-185.
22. Bonin T. et al. Observations of the early evening boundary-layer transition using a small unmanned aerial system // Boundary Layer Meteorology, 2013, vol. 146, no. 1, pp. 119-132.
23. 5G Use Cases for Verticals China 2020 report. <https://www.gsma.com>
24. Aazam M. et al. Offloading in fog computing for IoT: Review, enabling technologies, and research opportunities // Future Generation Computer Systems, 2018, vol. 87, pp. 278-289.
25. Al Faruque M.A., Vatanparvar K. Energy Management-as-a-Service over fog computing platform // IEEE Internet of Things Journal, 2015, vol. 3, no. 2, pp. 161-169.
26. Mussomeli A. et al. Expecting digital twins. <https://www2.deloitte.com>
27. Accelerated component-based modeling approach, 2019. <https://akselos.com>
28. Брук П.А. Цифровые двойники, основанные на симуляции мультифизических процессов // Рациональное управление предприятием, 2019. № 1-2. С. 74-76.
29. MacDonald C. et al. Creating a digital twin for a pump // ANSYS Advantage, 2017, Issue 1, pp. 8-10.
30. Breaking New Ground: Digital Twin Helps Engineers Design Megawatt-Sized Circuit Breakers, 2015. <https://www.ge.com>
31. From crude to contextualized data: Extracting value from big data for the oil & gas industry, 2020. <https://www.cognite.com>
32. The future of the field: Performance-based contracts disrupt the oil & gas value chain, 2020. <https://www.cognite.com>
33. Mork B.E. Realizing the value of digitalized collaboration in pursuit of predictive maintenance, 2019. <https://old.cognite.com>
34. Stackpole B. Digital twins land a role in product design, 2019. <https://www.digitalengineering247.com>
35. Parris C. What is a Digital Twin? <https://www.ge.com>
36. GE digital twin: Analytic engine for the digital power plant. <https://www.ge.com>

37. Владов Р. А., Дозорцев В. М., Шайдуллин Р. А., Шундерюк М. М. Практические аспекты Четвертой промышленной революции // Автоматизация в промышленности. 2017. № 7. С. 7-13.
38. Venables M. Collaborative platform promises new digital reality // HartEnergy, 2017. <https://www.hartenergy.com>
39. Solutions: Browse through the applications and solutions on Kognifai, 2020. <https://www.kongsberg.com>
40. Greenfield digital twin: Getting off to a good start, 2020. <https://www.kongsberg.com>
41. Brownfield digital twin: It pays to plan ahead, 2020. <https://www.kognifai.com>
42. Digital twins & virtual prototypes, 2020. <https://www.maplesoft.com>
43. Developing Applications with Oracle Internet of Things Cloud Service, 2020. <https://docs.oracle.com>
44. D. Riemer. Why Siemens digital twin capabilities are the best in the market, 2017. <https://community.plm.automation.siemens.com>
45. Digital Enterprise for discrete industries, 2021. <https://new.siemens.com>
46. Simcenter Amesim как инструмент для создания цифровых двойников, 2019. <https://www.plm-ural.ru>
47. Vachálek J. et al. The digital twin of an industrial production line within the Industry 4.0 concept // In: 21st International Conference on Process Control, IEEE, 2017, pp. 258-262.
48. Ringsquandl M. et al. On event-driven knowledge graph completion in digital factories // In: 21st IEEE International Conference on Big Data, IEEE, 2017, pp. 1676-1681.
49. Constantinescu C. et al. A holistic methodology for development of real-time digital twins // Procedia CIRP, 2020, pp. 163-166.
50. Liu C. et al. Digital twin-enabled collaborative data management for metal additive manufacturing systems // Journal of Manufacturing Systems, 10.05.2020.
51. Liu Q. et al. Digital twin-based designing of the configuration, motion, control, and optimization model of a flow-type smart manufacturing system // Journal of Manufacturing Systems, 28.04.2020.
52. Vijayakumar K. et al. Digital twin for factory system simulation // International Journal of Recent Technology and Engineering, 2019, vol. 8, issue-1S2, pp. 63-68.
53. Janda, P. et al. Implementation of The Digital Twin Methodology // In: 30th DAAAM International Symposium, 2019, pp. 533-538.
54. Campos-Ferreira A.E. et al. Digital twin applications: a review // In: Memorias del Congreso Nacional de Control Automático. Puebla, México, 2019. <http://www.amca.mx>
55. Fuertes P.S. Building and exploiting a digital twin for the management of drinking water distribution networks // Urban Water Journal 2020, vol. 17, no.8, pp. 704-713.
56. Negri E. et al. A Digital Twin-based scheduling framework including Equipment Health Index and Genetic Algorithms // IFAC-PapersOnLine, 2019, vol. 52, issue 10, pp. 43-48.
57. Eschemann P. et al. Towards digital twins for optimizing the factory of the future. <https://www.offis.de>
58. Fergani O., Eissing K. 2020. A machine learning-based digital twin of the manufacturing process: metal powder-bed fusion case.
59. Haag S., Anderl R. Digital twin – proof of concept // Manufacturing Letters, 2018, vol. 15. pp. 64-66.
60. Zhang, H. et al. Information modeling for cyber-physical production system based on digital twin and AutomationML // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, vol. 107, pp. 1927-1945.
61. Hu C. et al. Application case of digital twin technology in electric power system // In: 5th International Conference on Mechanical Engineering Research, 2019. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020 (788). <https://iopscience.iop.org>
62. Fuller A. et al. Digital twin: enabling technologies, challenges and open research // In: IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 108952-108971.
63. Sjarov M. et al. The digital twin concept in industry – a review and systematization // In: 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2020, pp. 1789-1796.
64. Romero D. et al. Towards a cyber-physical PLM environment: the role of digital product models, Intelligent products, digital twins, product avatars and digital shadows // In: 21st IFAC World Congress, 2020.
65. Kamath V. et al. Industrial IoT and digital twins for a Smart Factory: an open source toolkit for application design and benchmarking // In: 2020 Global Internet of Things Summit, 2020, pp. 1-6.
66. Ashtari B., Weyrich M. Digital Twin of manufacturing systems: a case study on increasing the efficiency of reconfiguration // Automatisierungstechnik, 2020, vol. 68, no. 6, pp. 435-444.
67. Adamenko D. et al. Analysis and comparison of platforms for designing a digital twin // In: Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. – Springer International Publishing, 2020.
68. Lechler T. et al. Introduction of a comprehensive Structure Model for the Digital Twin in Manufacturing // In: 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2020, pp. 1773-1780.
69. Autiosalo J. et al. A Feature-Based Framework for Structuring Industrial Digital Twins // IEEE Access, 2019.
70. Abburu S. et al. COGNITWIN – Hybrid and Cognitive Digital Twins for the Process Industry // In: IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation, 2020, pp. 1-8.
71. Barth L. et al. Systematization of Digital Twins: Ontology and Conceptual Framework // In: 3rd International Conference on Information Science and System, 2020, pp. 13–23.
72. Worden K. et al. On digital twins, mirrors and virtualisations // In: Model Validation and Uncertainty Quantification, ser. 3, 2019, pp. 285-295. <https://eprints.whiterose.ac.uk>
73. Bécue A. et al. A new concept of digital twin supporting optimization and resilience of factories of the future // Applied Sciences, 2000, vol. 10, no. 13, pp. 4482-4511.
74. van der Valk H. et al. Digital twins in simulative applications: a taxonomy // In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2020, pp. 2695-2706.
75. Niggemann O. et al. The Digital twin from an artificial intelligence perspective. <https://arxiv.org>
76. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. Экспертно-аналитический доклад. – Технет, 2019. <http://assets.fea.ru>
77. Digital twin market size worth \$26.07 billion by 2025. <https://www.grandviewresearch.com>
78. Digital twin market worth \$48.2 billion by 2026. <https://www.marketsandmarkets.com>
79. Pettey C. Prepare for the impact of digital twins // Gartner, 2017. <https://www.gartner.com>
80. Боровиков А.И. и др. Дорожная карта по развитию сквозной цифровой технологии «Новые производственные технологии». Результаты и перспективы // Инновации. 2019. № 11(253). С. 89-104.
81. Leading the digital revolution transforming U.S. manufacturing. <https://www.manufacturingusa.com>
82. About Digital Catapult. <https://www.digicatapult.org.uk>
83. MIDIH – Manufacturing Industry. <https://midih.eu/project.php>
84. Kassner L. et al. The Social Factory: Connecting People, Machines and Data in Manufacturing for Context-Aware Exception Escalation // In: 50th Hawaii International Conference on System Sciences, 2017, pp. 173-1682.
85. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии», 2019. <https://digital.gov.ru>
86. Sheridan T. et al. Adapting automation to man, culture and society // Automatica, 1983, vol. 19, no. 6, pp. 605 – 612.
87. Bainbridge L. Ironies of Automation // Automatica. 1983, vol.19, no. 6, pp. 775-779.
88. Dozortsev V.M. et al. Computerized Operator Training: Continued Importance, New Opportunities, and the Human Factor // Automation and Remote Control, 2020, vol. 81, no. 5, pp. 935-954.
89. Tao F., Qi Q. Make more digital twins // NATURE, 2019, vol. 573, pp. 490-491.
90. Deuter A.A., Pethig F. The digital twin theory – a new view on a buzzword // PLM Portal, München, 2019. <https://www.plmportal.org>
91. Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital twin: values, challenges and enablers from a modeling perspective // IEEE Access. 2016. no. 4, pp. 1-33.
92. Wang Z. Digital twin technology, Industry 4.0 – impact on intelligent logistics and manufacturing, 2020. <https://www.intechopen.com>

Дозорцев Виктор Михайлович – д-р техн. наук, директор по стратегии и развитию бизнеса высокотехнологичных решений АО «Хонгелл».
Контактный телефон (495) 797-99-36.