

## ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В УПРАВЛЕНИИ: ОТРАСЛЕВАЯ СПЕЦИФИКА И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ

<sup>1</sup>Столяров А.Д., <sup>2</sup>Гордеев В.В., <sup>2</sup>Абрамов В.И.

<sup>1</sup>*Институт прикладных информационных технологий, Москва, e-mail: mr.alexst@gmail.com;*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, e-mail: v.gordeev@aerolabs.aero, viabramov@mephi.ru*

В условиях быстрых изменений цифровые двойники становятся необходимым инструментом для повышения уровня обоснования и оперативности принятия экономически выгодных решений. С их помощью производители могут глубже понять сложные физические системы и производственные операции, оптимизировать планирование производства или смоделировать сценарии «что будет, если», чтобы, например, понять последствия запуска новых продуктов. Технология цифровых двойников развивается с высокой скоростью, и поэтому целью работы является обоснование актуальности и эффективности внедрения цифровых двойников в управление предприятиями с учетом рассмотрения практических аспектов их внедрения и анализа отраслевой специфики. В ходе исследования были проанализированы и оценены мировые и отечественные подходы и методологии использования цифровых двойников для совершенствования управления бизнесом в современных условиях, а также применены общенаучные методы исследования: анализ, синтез и обобщение на основе библиометрического изучения баз данных Scopus и eLibrary с учетом сформулированных задач. Показано, что цифровые двойники выполняют ключевую функцию в повышении эффективности управления компаниями в различных областях; обсуждаются конкретные способы, применяемые для достижения более высокого качества управленческой деятельности. Представлены особенности практического использования цифровых двойников в промышленности на всех этапах жизненного цикла. Предложена концептуальная модель цифрового двойника предприятия. Далее дается обоснование того, что в среде, где способность своевременно находить и принимать качественные решения создает конкурентные преимущества, цифровые двойники становятся незаменимым инструментом обеспечения высокой результативности бизнеса.

**Ключевые слова:** цифровые двойники, цифровые технологии, рекомендательные сервисы, интернет вещей, сбор и обработка данных, программное обеспечение

## DIGITAL TWINS IN MANAGEMENT: INDUSTRY SPECIFICS AND PRACTICAL ASPECTS OF CREATION

<sup>1</sup>Stolyarov A.D., <sup>2</sup>Gordeev V.V., <sup>2</sup>Abramov V.I.

<sup>1</sup>*Institute of Applied Information Technologies, Moscow, e-mail: mr.alexst@gmail.com;*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, e-mail: v.gordeev@aerolabs.aero, viabramov@mephi.ru*

In fast-paced environments, digital twins are becoming a necessary tool to improve the level of justification and efficiency of making cost-effective decisions. They can help manufacturers gain a deeper understanding of complex physical systems and manufacturing operations, optimize production planning, or simulate what-if scenarios to understand the impact of new product launches, for example. The technology of digital twins is developing at a high speed, and therefore the goal of the work is to substantiate the relevance and effectiveness of the implementation of digital twins in enterprise management, taking into account the consideration of the practical aspects of their implementation and analysis of industry specifics. During the study, global and domestic approaches and methodologies for using digital twins to improve business management in modern conditions were analyzed and assessed, and general scientific research methods were applied: analysis, synthesis and generalization based on a bibliometric study of Scopus and eLibrary databases, taking into account the formulated tasks. It is shown that digital twins have a key function in improvement of the management efficiency of organizations in various fields. Specific methods used to achieve higher quality management activities are discussed. Specificity of practical use of digital twins in industry at all stages of the life cycle is presented. It further argues that in an environment where the ability to find and make quality decisions in a timely manner creates competitive advantage, digital twins become an indispensable tool for ensuring high business performance.

**Keywords:** digital twins, digital transformation, digital technologies, recommendation services, Internet of things, data collection and processing, software

### Введение

В условиях современной турбулентной экономической среды традиционные методы управления часто не справляются со сложностью современного бизнеса, поэтому для обеспечения его устойчивости и жизнеспособности, получения дополни-

тельных конкурентных преимуществ необходимы инновационные решения [1]. Глобальная ситуация нелегкой борьбы производителей за потребителя на фоне интенсивной цифровизации превратила цифровую трансформацию из полезной технологической перспективы в жизненно важную необходимость серьезно укре-

плять и расширять свои позиции на рынке благодаря предпринимательским подходам и инновациям. Разработка, внедрение и следование стратегии по цифровизации дают компаниям мощные конкурентные преимущества, позволяя в перспективе применять лучшие практики и опережать рынок по скорости бизнес-процессов. Наличие стратегии цифровизации позволяет, кроме того, совершенствовать компетенции сотрудников и налаживать новые виды коммуникации с клиентами [2]. Следует отметить, что распространение цифровых технологий расширило возможности и скорости обмена данными и знаниями [3], и это, в свою очередь, формирует для компаний новые требования в целях обеспечения конкурентоспособности в управлении. Современные архитектуры систем способны обрабатывать большие объемы данных, что позволяет гибко масштабировать рабочую нагрузку [4]. Важным фактором при этом становится использование методик предиктивного анализа и персонализированных предложений [5]. Исследования McKinsey показывают, что руководители динамично развивающихся организаций демонстрируют в 2,1 раза большую операционную устойчивость, в 2,5 раза более высокие финансовые показатели, в 3,0 раза больший рост и в 4,8 раза больше инноваций, чем их коллеги, развивающиеся медленнее [6].

Цифровые двойники – один из важнейших инструментов цифровой трансформации бизнеса. С 2017 г. они стали одной из 10 долгосрочных технологических тенденций, по версии Gartner. Цифровой двойник для целей данной работы понимается как зеркальное отображение объекта материального мира (товара, бизнес-процесса, услуги) в цифровом пространстве. Целью конструирования данного цифрового отображения является наблюдение за состоянием объекта для современного выявления его изменений. Реализация такого отображения возможна только при постоянном сборе, обработке и постоянном изучении информации об объекте и позволяет при этом корректировать само цифровое отображение и повышать качество управления [7]. За счет точного воспроизведения своей материальной копии цифровой двойник дает возможность автоматически строить прогнозы поведения материального объекта и выявлять пути оптимизации данного объекта [8]. В соответствии с Gartner: «Цифровой двойник – это цифровая копия физических активов (физических двойников), процессов, людей, мест, систем и устройств, которые могут использоваться для различных целей... цифровые двойники объеди-

няют искусственный интеллект, машинное обучение и программный анализ с графами пространственных сетей для создания живых цифровых имитационных моделей, которые обновляются и меняются по мере изменения их физических аналогов» [7]. Использование цифровых двойников (ЦД) – это подход, отвечающий лучшим мировым практикам и требующий использования передовых технологий для должной реализации. Внедрение ЦД позволяет качественно трансформировать процесс принятия решений, переводя его из логики, основанной на прошлом, в логику «из будущего». Как на уровне научных исследований, так и на уровне управления растет понимание актуальности и ценности развития технологий ЦД в различных областях. Цифровые двойники приобретают все большее значение в управлении благодаря их способности предоставлять значимую и достоверную информацию, повышать операционную эффективность и поддерживать принятие решений на основе данных. Они позволяют организациям понимать поведение и производительность своих активов или процессов в режиме реального времени, выявлять потенциальные проблемы и принимать упреждающие меры для снижения рисков и повышения производительности.

**Цель исследования** – дать обоснование востребованности и целесообразности включения цифровых двойников в систему управления предприятиями и предложить схему создания цифрового двойника с использованием информационных систем, используемых в организациях.

#### **Материал и методы исследования**

В исследовании применялись общенаучные теоретические методы, такие как контекстуальный поиск и анализ, методы индукции и дедукции, синтез и построение описания, а также прикладные методы сравнительного и системно-структурного анализа.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

##### *Возможности использования цифровых двойников и их отраслевые особенности*

В обрабатывающей промышленности цифровые двойники широко используются для оптимизации производственных процессов. Создавая виртуальные копии производственных предприятий и оборудования, организации могут моделировать различные сценарии и анализировать влияние на эффективность производства, использование ресурсов и общую производитель-

ность. Это позволяет менеджерам выявлять узкие места, оптимизировать операции и рабочие процессы для достижения максимальной производительности и экономической эффективности.

На производстве ЦД находят применение в организации профилактического и текущего обслуживания и контроля за использованием технических средств. Постоянно отслеживая и анализируя данные от машин и оборудования в режиме реального времени, предприятия могут обнаруживать ранние признаки потенциальных проблем или сбоев. Такой подход гарантирует своевременное превентивное проведение технического осмотра, отсутствие или снижение количества непредвиденных отказов и расходов, связанных с выходом оборудования из строя. Цифровые двойники также облегчают управление активами, предоставляя информацию о состоянии активов, моделях использования и производительности, позволяя организациям оптимизировать графики технического обслуживания, продлевать жизненный цикл активов и повышать общую эффективность оборудования.

Цифровые двойники играют неосценимую роль в мониторинге и контроле качества на производстве в режиме реального времени. Благодаря появлению виртуальных копий продуктов или их компонентов появляется возможность постоянного наблюдения и мониторинга их характеристик в процессе производства. Подключение датчиков и IoT-устройств создает условия для сбора данных в режиме реального времени и их анализа, а также проверки соответствия установленным характеристикам качества. Поэтому компании имеют доступ к быстрому выявлению аномалий, обнаружению дефектов и принятию корректирующих мер, что обеспечивает высокое качество продукции и минимизирует повторную доработку или потери.

Цифровые двойники занимают особое место в оптимизации управления энергопотреблением и распределения ресурсов в энергетическом и коммунальном секторах. Разработка цифровых моделей энергетических систем дает больше возможностей для сбора и обработки данных об энергопотреблении. Для данной сферы крайне актуальными являются модели, позволяющие эффективно и в реальном времени балансировать потери электроэнергии, минимизировать затраты на генерацию, минимизировать отходы, прогнозировать загрузку, оптимально осуществлять превентивное обслуживание оборудования, в реальном времени просчитывать разные сценарии распределения ресурсов. Все это дает воз-

можность принимать обоснованные решения для достижения большей надежности и устойчивости функционирования систем.

Благодаря появлению цифровых двойников транспортных средств и транспортных сетей предприятия в реальном времени проводят мониторинг производительности транспортных средств, условий движения на дорогах и спроса со стороны клиентов. Таким способом достигаются оптимизация использования автопарка, улучшение планирования маршрутов, сокращение расхода топлива и времени доставки. Цифровые двойники также оказывают помощь в предиктивной аналитике для прогнозирования спроса, предоставляя возможность заранее предвидеть и учитывать потребности клиентов и соответствующим образом корректировать логистические операции.

В транспортном и логистическом секторе применение цифровых двойников обеспечивает прозрачность цепочки поставок и контроль рисков. Сети цепочек поставок, представленные в виде цифровых двойников, в режиме реального времени отслеживаются на уровне информации об уровне запасов, маршрутах транспортировки и графиках доставки. Такие данные предоставляют доступ к сведениям о товарах, проходящих через цепочку поставок, что повышает ее надежность в плане управления и безопасности, а также значительно ограничивает риски нарушения сроков и перебоев в работе. Кроме того, цифровые двойники способны указывать на наличие опасных факторов, таких как нехватка ресурсов, ограничение пропускной способности или проблемы, связанные с погодными условиями, что помогает оперативно реализовывать планы на случай непредвиденных обстоятельств и смягчать последствия.

Для оптимизации складов и управления запасами также актуальны цифровые двойники. Добиться рациональной планировки склада, умного распределения площадей и лучшей организации процессов транспортировки материалов можно путем построения виртуальных моделей складов. В результате повышается операционная эффективность, снижаются затраты на складские запасы и минимизируются сроки выполнения заказов. Кроме того, в режиме реального времени обеспечивается контроль за уровнем запасов, предупреждаются их дефицит и полное отсутствие, происходит настройка процессов пополнения запасов, что в целом улучшает всю систему управления складскими запасами.

Цифровые двойники обеспечивают целостное представление о поведении клиентов за счет интеграции данных из раз-

личных источников, таких как системы торговых точек, программы лояльности клиентов, платформы электронной коммерции и социальные сети. Анализируя эти данные, ритейлеры и компании, производящие потребительские товары, получают представление о предпочтениях покупателей, их поисковых привычках, опыте покупок и отзывах о товарах. Эта информация помогает прогнозировать будущие тенденции и модели спроса, позволяя предприятиям принимать основанные на данных решения относительно уровня запасов и предложений продуктов.

*Прикладные задачи разработки цифровых двойников и систем поддержки принятия решений на основе применения цифровых двойников*

Для разработки практически применимого и достаточно точного цифрового двойника компании необходима организация сбора и обработки большого количества данных из множества источников. К таким данным, в частности, относятся сигналы с датчиков и сенсоров, размещаемых на оборудовании, архивные данные из систем управления производством и диспетчерских систем, данные о техническом обслуживании и внешние источники данных, включая информацию о погодных условиях или рыночных тенденциях [9]. Следует отметить, что при управлении данными и информацией с помощью моделей цифровых двойников модель проводит измерения только для управления и хранения данных [10]. Собранные данные должны охватывать различные аспекты физической системы, чтобы обеспечить всестороннее представление в цифровом двойнике. Вместе с тем, прежде чем интегрировать данные в модель цифрового двойника, крайне важно предварительно обработать и очистить их. Это предполагает и удаление выбросов, и восполнение недостающих значений, и нормализацию данных для достижения согласованности и точности. Чтобы повысить качество данных, подходят такие методы предварительного редактирования, как сглаживание, фильтрация и агрегирование данных.

Важно понимать, что интеграция данных из разных источников – важнейший шаг в создании цифрового двойника. Для выполнения этой задачи требуется отлаживание процесса сбора данных по различным каналам, при необходимости их структурирование с помощью различных методов, и приведение данных в соответствие спроектированной системе управления данными. Данные реального времени, а также исторические данные о работе всегда долж-

ны быть доступны цифровому двойнику. Для этого нужен механизм интеграции и обработки реальных эксплуатационных данных в цифровом двойнике. Активный сбор данных означает, что операционные данные должны быть доступны для имитационных моделей цифрового двойника без задержки по времени, чтобы реальность могла быть представлена цифровым двойником.

Выбор правильных методов и инструментов моделирования очень важен для точного представления физической системы в цифровом двойнике. Для этого могут использоваться математические модели, модели на основе физики, статистические модели или алгоритмы машинного обучения. Применение того или иного подхода зависит от множества факторов, к которым, прежде всего, относятся тип и объем доступных данных, а также сложность оцифровываемой системы. Выбор оптимальной технологии для создания цифрового двойника является определяющим с точки зрения дальнейшей его практической применимости.

В основу цифровой модели двойника закладываются актуальные данные, которые были получены, обработаны, учтены и интегрированы в ходе выполнения всех предшествующих работ. Это включает в себя сопоставление компонентов, атрибутов и поведения физической системы с их цифровыми аналогами. Модель цифрового двойника должна точно воспроизводить взаимодействие и динамику физической системы, позволять проводить моделирование и анализ. Важно иметь возможность запустить моделирование для проверки точности этой модели и эффективности. Моделирование включает в себя тестирование различных сценариев, входных данных и параметров для оценки поведения и производительности цифрового двойника. Это позволяет предприятиям выявлять любые несоответствия или ограничения в модели и вносить необходимые корректировки для повышения точности и надежности. Авторы статьи [11] также утверждают, что модель должна иметь эволюционные характеристики, улучшающиеся со временем и по мере накопления данных, а также отслеживать эволюцию реальной среды. Для того чтобы созданная модель была релевантной и эффективно использовалась для принятия решений, необходимо внедрять и отлаживать процедуры по обеспечению должного качества данных, управлению данными и осуществлять регулярный мониторинг показателей. В качестве решения этой задачи предлагается модель, состоящая фактически из двух цифровых двойников объекта – один из них применяется для мониторинга

текущих процессов и состояний физической среды, а второй – для тестирования, отслеживания эффекта от внедрения изменений, моделирования результатов и, в случае положительных результатов, изменения физической среды [12].

Авторы работы [13] дают собственное определение цифрового двойника, основанное на общности определений, расширенное за счет способности цифрового представления автоматически изменять и контролировать физический актив. Авторы выделяют несколько функций цифрового двойника:

- цифровой двойник должен представлять собой цифровое представление физического актива, включая максимально реалистичные модели и все доступные данные о физическом активе;

- данные должны содержать все данные процесса, полученные в ходе эксплуатации, а также всю организационную и техническую информацию, появившуюся и собранную в ходе разработки актива;

- цифровой двойник должен всегда быть синхронизирован с физическим активом;

- должна существовать возможность запускать моделирование поведения физического актива на цифровом двойнике.

Кроме того, для реализации всего потенциала цифрового двойника, по мнению авторов, необходимы следующие аспекты:

- уникальный идентификатор для идентификации цифрового двойника;

- система управления версиями для отслеживания изменений, внесенных в цифровой двойник в течение его жизненного цикла;

- интерфейсы между цифровыми двойниками для совместного моделирования и обмена данными;

- интерфейсы к инструментам, в которых выполняются модели;

- интерфейс с другими цифровыми двойниками для совместного моделирования.

Цифровые двойники в значительной степени полагаются на данные, собираемые с сенсоров и устройств интернета вещей. Интеграция этих устройств в экосистему цифровых двойников позволяет осуществлять сбор, мониторинг и контроль данных в режиме реального времени. Для этой интеграции требуются протоколы подключения, механизмы передачи данных и инфраструктура хранения данных в целях обеспечения бесперебойной связи между физической системой и цифровым двойником.

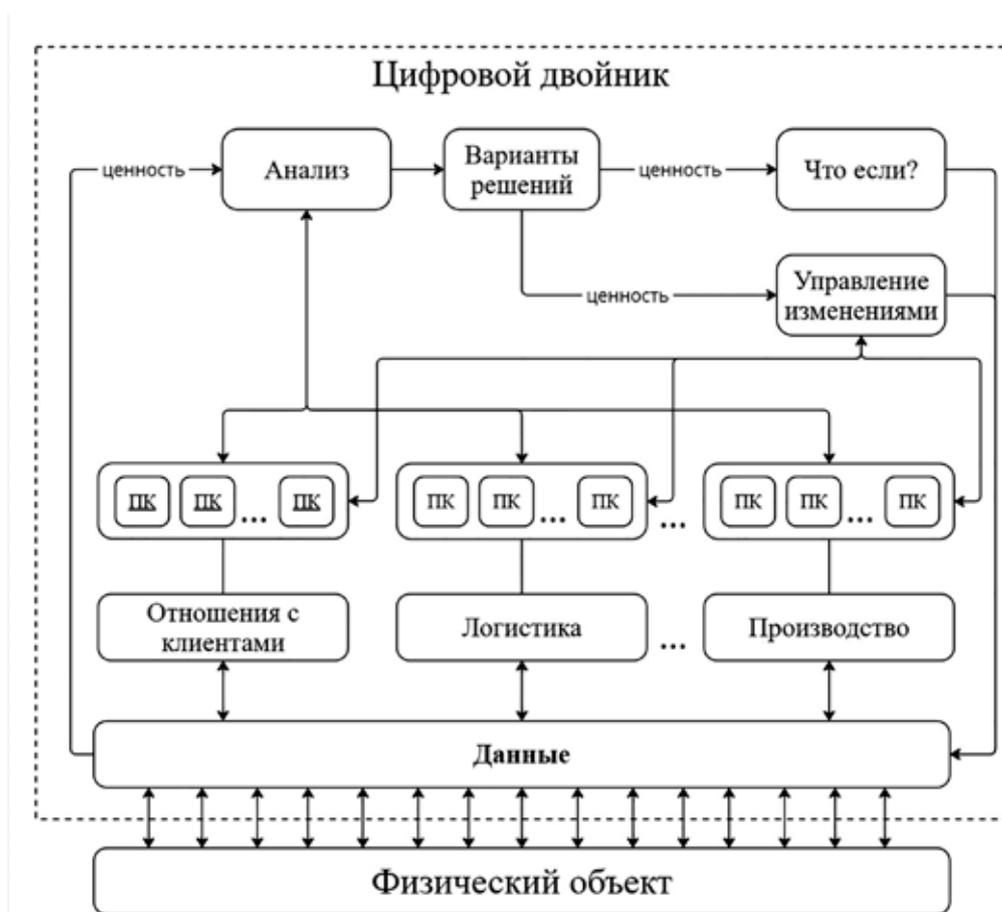
Эффективное и бесшовное взаимодействие между различными развивающимися системами и источниками данных возможно только при стандартизации этого процесса со стороны организации. Принятие стандартов управления данными и цифро-

выми двойниками, надлежащее документирование разработки гарантируют соответствие всех систем и снижают риски, связанные с человеческим фактором. Примеры таких стандартов включают OPC UA (унифицированная архитектура), MQTT (транспорт телеметрии очереди сообщений) и REST API (интерфейсы прикладного программирования передачи репрезентативного состояния).

Интеграция цифрового двойника с существующими системами и инфраструктурой необходима для достижения максимальной ценности и эффективности. Для этого нужно интегрировать цифровой двойник с системами управления взаимоотношениями с клиентами (CRM), управления цепочками поставок (SCM), системами управления производством (MES) и прочими операционными системами. Такая плавная интеграция делает возможными обмен данными, координацию технологических процессов и выработку решений на основе получаемых из цифрового двойника массивов данных в режиме реального времени.

Цифровые двойники генерируют огромные объемы данных, которые можно анализировать для получения ценной информации. Для определения закономерностей, тенденций, а также аномалий, отклонений и корреляций в данных можно использовать такие методы анализа данных, как статистический анализ, алгоритмы машинного обучения и распознавания образов. Результаты анализа и полученные таким способом данные учитываются и применяются в ходе оптимизационных процессов в целях обеспечения более высокой производительности и выработки компетентных и ответственных решений. Для представления информации в четкой и лаконичной форме рекомендуется использовать такие методы визуализации, как приборные панели, диаграммы и графики. Это поможет заинтересованным сторонам легко понять основные выводы, разобраться в поведении системы и выявить области, требующие улучшения.

Цифровые двойники могут быть интегрированы с системами поддержки принятия решений для обеспечения аналитики в реальном времени и поддержки процессов принятия решений. Анализируя данные, генерируемые цифровым двойником, системы поддержки принятия решений могут предоставлять рекомендации, оповещения и прогнозы. Благодаря таким средствам руководители и сотрудники компаний участвуют в принятии обоснованных решений, обеспечивают операционную эффективность и сокращают количество опасных и затратных просчетов.



Концептуальная структурная схема цифрового двойника предприятия  
 Источник: разработано авторами

Таким образом, создание цифровых двойников включает в себя сбор и интеграцию данных, моделирование и симуляцию физической системы, обеспечение возможности подключения и взаимодействия, а также использование аналитики для поддержки принятия решений. Эти практические аспекты имеют решающее значение для организаций, которые могут успешно внедрить цифровые двойники и раскрыть свой потенциал в различных отраслях.

С учетом приведенных выше особенностей на рисунке приведена структурная схема цифрового двойника. Фундаментом схемы является физический объект (в нашем случае – предприятие), который непрерывно и в двух направлениях обменивается данными с цифровым двойником. По направлению вверх загружается информация о параметрах и состояниях физического объекта, а по направлению вниз – управляющие воздействия (сигналы). Данные при этом могут храниться как на облачном, так и на локальном сервере. Цифровой двойник включает в себя все сферы (отде-

лы) деятельности предприятия. На схеме для примера отображены только «отношения с клиентами», «логистика», «производство», но фактически направления этого блока зависят от сферы деятельности конкретной организации.

«ПК» на схеме означает «Персональный компьютер», каждый из которых представляет собой лицо, принимающее решения и отвечающее за определенный участок работы компании в рамках соответствующего направления.

Процесс взаимодействия с физическим объектом протекает в режиме реального времени, при этом ведется активный сбор данных. Блок операционного управления включает все функциональные модули предприятия с рабочими местами сотрудников, для примера на рисунке представлены ключевые компоненты управления: управление отношениями с клиентами, управление цепочками поставок и управление производственными процессами. Изменения происходят на основе текущего анализа в контексте создания ценности для потре-

бителей. Часто в моделируемых системах появляются критерии принятия решений, оптимизация которых приводит к противоречиям. Когда идеальные значения каждого отдельного параметра обратно пропорциональны идеальным значениям других параметров, входящих в оптимизационную задачу, эффективным способом решения является применение парето-оптимальных решений [14]. После проведения анализа в парадигме «что, если» и выбора оптимального варианта решения осуществляется управление изменениями с учетом обратных связей.

### Заключение

В условиях быстрых и постоянных изменений во внешней среде важно принимать управленческие решения в логике, ориентированной на будущее, что можно реализовать с помощью цифровых двойников. В работе предложена концептуальная структурная схема цифрового двойника предприятия с учетом операционных функциональных блоков управления, анализом результатов предприятия в контексте создания ценности для клиентов и управления изменениями на основе обратных связей. Цифровые двойники являются передовой технологией в быстро меняющемся мире, позволяющей оперативно принимать сложные решения, при этом пользуясь логикой «из будущего», и учитывающей уникальный контекст, в котором находится система, оптимизируя эти решения по множеству критериев.

### Список литературы

- Ghisetti C., Montresor S. On the adoption of circular economy practices by small and medium-size enterprises (SMEs): Does “financing-as-usual” still matter? // *Journal of Evolutionary Economics*. 2019. № 30 (2). P. 559–586. DOI: 10.1007/s00191-019-00651-w.
- Абрамов В.И., Абрамов И.В., Поливанов К.В., Семенов К.Ю. Концептуальная модель цифровой системы аналитической поддержки дистанционного управления персоналом организации // *Экономика, предпринимательство и право*. 2023. Т. 13, № 7. С. 2341–2352. DOI: 10.18334/ep.13.7.118326.
- Hanelt A., Bohnsack R., Marz D., Marante A.C. A Systematic Review of the Literature on Digital Transformation: Insights and Implications for Strategy and Organizational Change // *Journal of Management Studies*. 2021. Vol. 58 (5). P. 1159–1197.
- Столяров А.Д., Гордеев В.В., Абрамов В.И. Архитектура системы кластеризации пассажиров // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2023. № 1. С. 136–148. DOI: 10.21685/2227-8486-2023-1-9.
- Абрамов В.И., Гордеев В.В., Столяров А.Д. Методика прогнозирования потребностей клиентов бизнес-экосистем на основе кластерного анализа // *Современные наукоемкие технологии*. 2023. № 6. С. 9–13. DOI: 10.17513/snt.39624.
- Smet A.D., Mygatt E., Sheikh I., Weddle B. The need for speed in the post-COVID-19 era- and how to achieve it. September. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/people%20and%20organizational%20performance/our%20insights/the%20need%20for%20speed%20in%20the%20post%20covid%2019%20era%20and%20how%20to%20achieve%20it/the-need-for-speed-in-the-post-covid-19-and-how-to-achieve-it.pdf?shouldIndex=false> (дата обращения: 25.05.2024).
- Aronow S., Ennis K., Romano J. Login Page 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gartner.com/document/3875506?ref=solrAll&refval=212943992&qid> (дата обращения: 25.05.2024).
- Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с.
- Bambura R., Solc M., Dado M., Kotek L. Implementation of digital twin for engine block manufacturing processes // *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*. 2020. Vol. 10 (18). P. 6578. DOI: 10.3390/app10186578.
- Qi Q., Tao F., Hu T., Anwer N., Liu A., Wei Y., Wang L., Nee A. Enabling technologies and tools for digital twin // *Journal of Manufacturing Systems*. 2019. Vol. 58 (B). P. 3-31. DOI: 10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
- Tao F., Cheng J., Qi Q., Zhang M., Zhang H., Sui F. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 94 (9-12). P. 3563-3576. DOI: 10.1007/s00170-0170233-1.
- Negri E., Berardi S., Fumagalli L., Macchi M. MES-integrated digital twin frameworks // *Journal of Manufacturing Systems*. 2020. Vol. 56. P. 58-71. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.05.007.
- 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. № 11. P. 1016–1022.
- Столяров А.Д., Гордеев В.В., Абрамов В.И. Методика поиска многокритериальных решений на основе цифровых двойников // *Экономика и управление*. 2023. Т. 29, № 7. С. 851-858. DOI: 10.35854/1998-1627-2023-7-851-858.