



## KAPITEL 3 / CHAPTER 3<sup>3</sup>

# THE REALIZATION METHOD FOR DIGITAL TWINS OF INDUSTRIAL PRODUCTION ENTERPRISES

МЕТОД РЕАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

DOI: 10.30890/2709-2313.2022-08-02-001

### Введение

Высоко конкурентные рынки, широкомасштабный переход промышленности на массовое производство изделий, индивидуализированных под персональные потребности клиентов, сокращение жизненного цикла и повышение производительности можно считать основными движущими силами, ведущими к разработке, производству и внедрению новых изделий, производственных технологий и систем. Все это требует управления, способного быстро адаптироваться и реагировать на изменения во внешней и производственной среде, обеспечивая гибкость, реконфигурируемость, устойчивость к сбоям и большую эффективность всего производственного процесса. При этом все изменения в этапах жизненного цикла и управлении должны выполняться, непрерывно «на лету». Благодаря цифровым технологиям «Индустрии 4.0» появилась возможность виртуализации объектов и процессов предприятий, которые являются аналогами бизнес и физической реальности предприятия в реальном масштабе времени. Поэтому промышленность сегодня начинает проводить исследования и эксперименты в этой новой области, которая определяется термином «цифровой двойник» (Digital Twin) [1].

Gartner, известная международная исследовательская и консультационная компания, описывает технологию цифровых двойников как одну из десяти ведущих стратегических технологических тенденций [2]. Применение парадигмы цифрового двойника в промышленности следует рассматривать как одно из стратегических направлений развития производственных предприятий. Возможности использования этой парадигмы на предприятии необычайно широки, так как она может быть применена ко всем областям его деятельности.

С другой стороны, в настоящее время все современные предприятия проходят долгий и сложный путь формирования своих дорогостоящих ИТ активов в виде программных пакетов CAD, CAM, CAPP, ERP, MES и пытаются решить проблему их интеграции. Предприятия давно осознали необходимость интеграции данных этих систем и стараются сделать это масштабируемым и

<sup>3</sup> Authors: Sukhomlinov A. I.



эффективным способом. Расходы на системную интеграцию быстро растут из года в год, и на них приходится все более значительная часть расходов промышленных компаний [3].

Несмотря на то, что сегодня многие говорят о цифровых двойниках, и на то, что они занимают видное место в прогнозах аналитиков [3], в действительности эта концепция находится еще в начальной стадии своего развития. Современные немногочисленные публикации, в основном, сосредоточены на концептуальных идеях с очень ограниченными практическими примерами и промышленными приложениями [4]. 85% практических приложений цифрового двойника, разработанных к настоящему времени, относятся к производственным устройствам, и только 11% - к общему производственному процессу и потоку [4]. Фактически отсутствуют определения и методы реализации целостных моделей и архитектур, способных эффективно интегрировать различные видения цифровых двойников в промышленных производственных предприятиях. Путаница вокруг цифровых двойников коренится в их почти неограниченном потенциале, практически безграничной области применения в сочетании с различными и часто узкими школами мысли в отраслях, и это препятствует широкому распространению парадигмы.

Целью данной статьи является разработка универсального метода практической реализации интегрированных цифровых двойников промышленных производственных предприятий, а также определение способа перехода от традиционных информационных систем управления предприятиями к системам, основанным на концепции цифрового двойника.

### **3.1. Понятие цифрового двойника**

Концепция цифрового двойника и ее модель впервые были предложены профессором Технологического университета Флориды Майклом Гривзом на форуме по управлению Общества по технологии машиностроения (Society of Manufacturing Engineering) в октябре 2002 г. Хотя первоначально им не было дано названия модели, вскоре с развитием этой концепции соответствующий ей термин был сформулирован. Дальнейшее ее усовершенствование и сотрудничество в этой области с Джоном Викерсом из NASA привело к формулировке термина в его окончательном современном виде [5], где было заявлено, что «цифровой двойник – это интегрированная мультифизическая многомасштабная симуляция транспортного средства или автомобиля.



Система, которая использует лучшие доступные физические модели, обновления датчиков, историю ног и т. д., чтобы отразить жизнь соответствующего летающего близнеца». Фактически, программа NASA Apollo была первым случаем в истории создания копии продукта. Однако наземный спаренный аппарат остался аппаратным двойником (копией) космического модуля, а не цифровым. В дальнейшем понятие цифрового двойника становится все более конкретным, что привело к некоторым специальным понятиям, таким как цифровой двойник планера, или экспериментальный цифровой двойник. С тех пор концепция цифрового двойника становится популярной темой исследований.

Существуют разные понимания цифрового двойника [6]. Так, одно из широко признанных в научных кругах определений устанавливает: «Цифровой двойник - это интегрированное мультифизическое, многомасштабное, вероятностное моделирование сложного продукта, которое использует лучшие доступные физические модели, обновления датчиков и т. д., чтобы отразить жизнь соответствующего двойника» [7]. Другое определение цифрового двойника, с точки зрения сообщества производителей, утверждает: «Цифровой двойник состоит из виртуального представления производственной системы, которое способно работать в различных дисциплинах моделирования и характеризуется синхронизацией между виртуальной и реальной системой, благодаря полученным данным и подключенным интеллектуальным устройствам, математическим моделям и обработке данных в реальном времени. Актуальная роль цифрового двойника в производственных системах Индустрии 4.0 заключается в использовании этих функций для прогнозирования и оптимизации поведения производственной системы» [8]. Иное определение, сформулированное также производителями, утверждает: «Цифровой двойник производственной системы – это многоуровневая цифровая модель, описывающая продукт, процессы и ресурсы в среде их функционирования, т.е. позволяющая моделировать процессы, происходящие в реальной системе, а также собирать и отображать в реальном времени данные о состоянии объектов, полученные от программируемых логических контроллеров и датчиков, установленных в производственной системе, как на промышленном оборудовании, так и в его окружении» [9]. В свою очередь, авторитетная компания Gartner утверждает, что цифровой двойник - это цифровое представление сущности или системы реального мира. Реализация цифрового двойника - это инкапсулированный программный объект или модель, которая отражает уникальный физический объект [2].



Как это очевидно, рассмотренные и другие определения даны на уровне абстракций высокого уровня и не раскрывают системно природу и структуру объектов, отражением которых является цифровой двойник, а также не определяют то, из чего он состоит, как он взаимодействует с реальным миром и как это все вместе работает.

Более полному раскрытию смысла цифрового двойника способствует другая концепция, известная как «цифровая нить» (digital thread), - термин, который можно перевести еще как и цифровой след или цифровой поток [3; 10; 11]. Поэтому любое содержательное обсуждение цифрового двойника, вероятно, должно также включать обсуждение этой другой, тесно связанной с ним новой концепции. Понимание этой концепции, связывающей процессы областей «материалы-дизайн-обработка-производство», является настолько важным, что заслуживает более подробного рассмотрения.

Концепция цифровой нити связывает воедино действия цифрового двойника и наборы данных о моделируемом им естественном оригинале. Так, согласно [11] цифровая нить/след на самом высоком уровне представления деятельности предприятия - это непрерывная цепочка данных, которая связывает каждую стадию жизненного цикла продукта от проектирования через изготовление и сборку и далее до использования его в реальных условиях. По сути, цифровая нить упорядоченно пронизывает все элементы данных, имеющие отношение к конкретному экземпляру объекта. Эти данные, их хранение, доступ к этим данным, средства моделирования и анализа - это то, что создает возможность проведения моделирования, анализа и осуществления эффективного управления в цепочке поставок, на участках производства и эксплуатации изготовленного предприятием продукта. Когда кто-то пытается представить себе цифрового двойника, он должен, прежде всего, вообразить некое «живое» явление – динамическую модель продукта или процесса, оптимизация которого является целью двойника. Цифровая нить в значительной степени позволяет цифровому двойнику выполнять эту задачу, предоставляя данные, необходимые двойнику для проведения анализа. В этом смысле цифровой двойник получает свою «жизнь» в основном за счет данных, предоставляемых цифровой нитью.

Вдаваясь в большие детали можно сказать, что взаимосвязанные наборы данных о реальном объекте предлагают более высокий уровень его понимания, чем каждый из этих наборов, взятый в отдельности. Эти унифицированные данные, называемые цифровой нитью, являются необходимой предпосылкой для создания цифрового двойника [3]. С внедрением новых цифровых



технологий, таких как дополненная реальность и Интернет вещей, которые оперируют и транспортируют огромные объемы данных из разрозненных источников, как никогда важно, чтобы компании имели четкую стратегию относительно того, как и почему они будут интегрировать свои различные операционные и информационные технологии. Цифровая нить - это важная основа, которая может превратить общую дилемму роста стоимости и сложности цифровой трансформации в возможность ускорить окупаемость, повысить гибкость управления изменениями и принять решения на основе данных. Цифровой двойник - это модель для контекстуализации, анализа и осознания ценности цифровой нити таким образом, чтобы на него можно было воздействовать и масштабировать в различных решениях и интерфейсных приложениях. Другими словами, ценность цифровой нити проявляется в отдельных примерах использования, обслуживаемых цифровыми двойниками.

### **3.2. Применение цифровых двойников**

Концепция цифрового двойника может быть распространена на любой продукт/объект, процесс или явление реального мира, например, искусственное сооружение, машину, человека или другое живое существо, город, организационную единицу, сельскохозяйственную продукцию, участок территории и т.п. Она может быть применена в социально-экономических, технических и военных сферах, в различных отраслях и областях деятельности, таких, как производство, маркетинг и сбыт, входная логистика, финансы и т.п.

На промышленных предприятиях цифровые двойники можно подразделить на два основных класса – цифровые двойники продукта/объекта и цифровые двойники процессов предприятия.

Цифровые двойники продукта/объекта решают задачи, связанные со всеми этапами его жизненного цикла, например, этапами разработки конструкции, технологической подготовки, изготовления, испытания, эксплуатации, технического обслуживания и т.п. Параметры продукта, собранные при помощи сенсоров могут быть использованы цифровым двойником для диагностики, улучшения продукта, подтверждения его работоспособности или определения текущего технического состояния. Цифровой двойник такого типа относится к цифровой модели конкретного актива, которая включает проектные спецификации и инженерные модели, описывающие его геометрию, материалы, компоненты и поведение. Что еще более важно, он также включает



данные о фактическом исполнении и эксплуатационные данные, уникальные для конкретного физического актива, который он представляет [12]. Например, для самолета цифровой двойник может быть идентифицирован по идентификатору единицы физического продукта, который может быть бортовым или серийным номером. Данные цифрового двойника самолета включают такие вещи, как конкретная геометрия, извлеченная из трехмерных моделей самолета, аэродинамические модели, технические изменения, внесенные в производственный цикл, свойства материалов, данные осмотра, эксплуатации и технического обслуживания, а также любые отклонения от утвержденных исходных проектных спецификаций из-за проблем и обходных путей для конкретной единицы продукта.

Цифровые двойники процессов учитывают специфику функциональной области предприятия, в которой они используются, такой как, например, производство, маркетинг и продажи, входная логистика, финансы и т.д. В производственной области можно привести ряд полезных вариантов использования цифровых двойников. При этом наибольшее влияние на ожидаемую доходность оказывает их применение в областях производственного процесса, производственной системы, производственного механизма или линии. Например, цифровой двойник производственного процесса для определения подходящих условий для максимальной его производительности; цифровой двойник производственной системы для отслеживания статуса производственного процесса и принятия решений о краткосрочном планировании и комплектовании персоналом, приводящих к более эффективному использованию активов и ресурсов.

Цифровой двойник производственных машин или линий может быть использован, например, для прогнозирования режимов снижения производительности и вмешательства в процедуры обслуживания, когда это применимо, включая как профилактическое обслуживание, так и обслуживание по состоянию. Для построения модели помимо исторических требуются также текущие данные в реальном времени, этим достигается повышенная доступность машин и снижение затрат на их техническое обслуживание. Этот пример показывает, что цифровые двойники, в случае широкомасштабных объектов и процессов, каким является предприятие, не являются автономными и независимыми между собой. Между их моделями должны быть отражены определенные связи. Цифровой двойник отдельной машины как продукта и цифровой двойник этой же машины как участника технологического процесса, не являются одним и тем же.



Цифровой двойник производственной системы можно определить как ориентированное на данные представление всех элементов системы производственного оборудования, системы потока материалов, системы потока создания ценности, системы операционных материалов и системы человеческих ресурсов [13]. Эти элементы связаны друг с другом и с информационной системой с помощью датчиков, исполнительных механизмов управления и систем связи. Основная цель цифрового двойника производственной системы - облегчить процесс принятия решений и автоматизацию решений с помощью моделирования. Цифровой двойник производственной системы можно рассматривать как интеллектуальную связь цифровых двойников элементов производственной системы. Следовательно, цифровой двойник производственной системы будет иметь свою собственную семантическую модель, описывающую отношения всех этих элементов. Кроме того, такой двойник может содержать отдельные технические данные, например, 2D или 3D и имитационные модели. 3D-модель может быть объединена с данными в конкретном приложении для визуализации производственной системы в реальном времени. Имитационные модели могут использовать данные в реальном времени для проведения имитационных экспериментов с учетом фактического состояния системы.

### **3.3. Требования к возможностям промышленных цифровых двойников**

Учитывая вышеизложенное, можно сформулировать основные положения и требования к возможностям промышленных цифровых двойников предприятия следующим образом.

1. Идея цифрового представления сущностей или систем реального мира не нова. Отличие последней итерации «цифровых двойников», в основном, состоит в том, что эта парадигма концентрирует наше внимание на тех новых возможностях в отображении реального мира, его изучении, моделировании и управлении им, которые открываются цифровыми технологиями четвертой промышленной революции Индустрия 4.0.

2. К цифровым технологиям, имеющим отношение к промышленным цифровым двойникам, в порядке их приоритетности, относятся следующие: аналитика больших данных и моделирование (промышленная аналитика), облачные сервисы, интернет вещей, интеллектуальные сенсоры, мобильные устройства, технология геопозиционирования, усовершенствованные интерфейсы человек-компьютер, виртуальная и дополненная реальность.



Развитие и применение этих технологий применительно к цифровому двойнику позволяют более точно и интегрировано отображать в моделях прикладную область мира в ее динамике и целенаправленно воздействовать на нее в реальном времени, добиваясь при этом значительно более высокой результативности. При этом используемые технологии оказывают на характеристики цифровых двойников следующее влияние.

- Усиление мощности/объема цифровой нити за счет более широкого и подробного отображения ею объектов, процессов и связей реального мира и их описательных характеристик, а также распространенного применения сенсорных устройств.

- Увеличение скорости передачи и масштаба охвата транспортируемых данных, команд и информации, как между самими объектами, так и между объектами и обрабатывающими центрами, рассматривая в качестве источников и приемников мобильные и стационарные объекты.

- Создание новых требуемых сервисов предприятия и улучшение существующих, включая сервисы аналитики больших данных при помощи продвинутых алгоритмов (статистического вывода, анализа «что если», оптимизации, искусственного интеллекта и экспертных систем), основанных на применении облачных сред, реализуемых высокопроизводительными платформами центров обработки данных.

3. Цифровые двойники на предприятии могут быть реализованы в виде ряда автономных или в виде сети связанных и взаимодействующих двойников. Естественное взаимодействие нескольких двойников предприятия возможно только при существовании интегрированной цифровой нити. В противном случае требуется применение специальных методов и технологий интеграции.

4. Цифровая нить двойника может быть организована на основе применения реляционных моделей данных или более сложных семантических моделей. Однако физическая реализация цифровой нити в ближайшем будущем, скорее, будет осуществляться в средах систем реляционных баз данных.

5. Цифровой двойник предприятия может быть выполнен в локальном или в распределенном исполнении. По мере развития, освоения и распространения этой новой парадигмы акцент будет сдвигаться в сторону развертывания распределенных цифровых двойников.

6. Промышленный цифровой двойник должен бесшовно интегрировать в себе как область продукта/объекта, так и процессов предприятия. Это требование вносит принципиальные и важные изменения в традиционную



архитектуру автоматизации предприятия, когда ее части, имеющие отношений к технологическим процессам и административно-организационному управлению, существовали разделено из-за ограниченных возможностей и специфики используемых технических платформ автоматизации. Интеграция этих двух областей позволит существенно расширить потенциал промышленной аналитики двойника предприятия за счет появления в цифровой нити данных нового типа, описывающих взаимосвязи, действующие между его бизнес и физической реальностью.

7. Наполнение данными цифровой нити, моделирование и решение задач сервисами, приложениями и цифровым двойником должны выполняться в реальном масштабе времени событий и процессов бизнес и физической реальности предприятия.

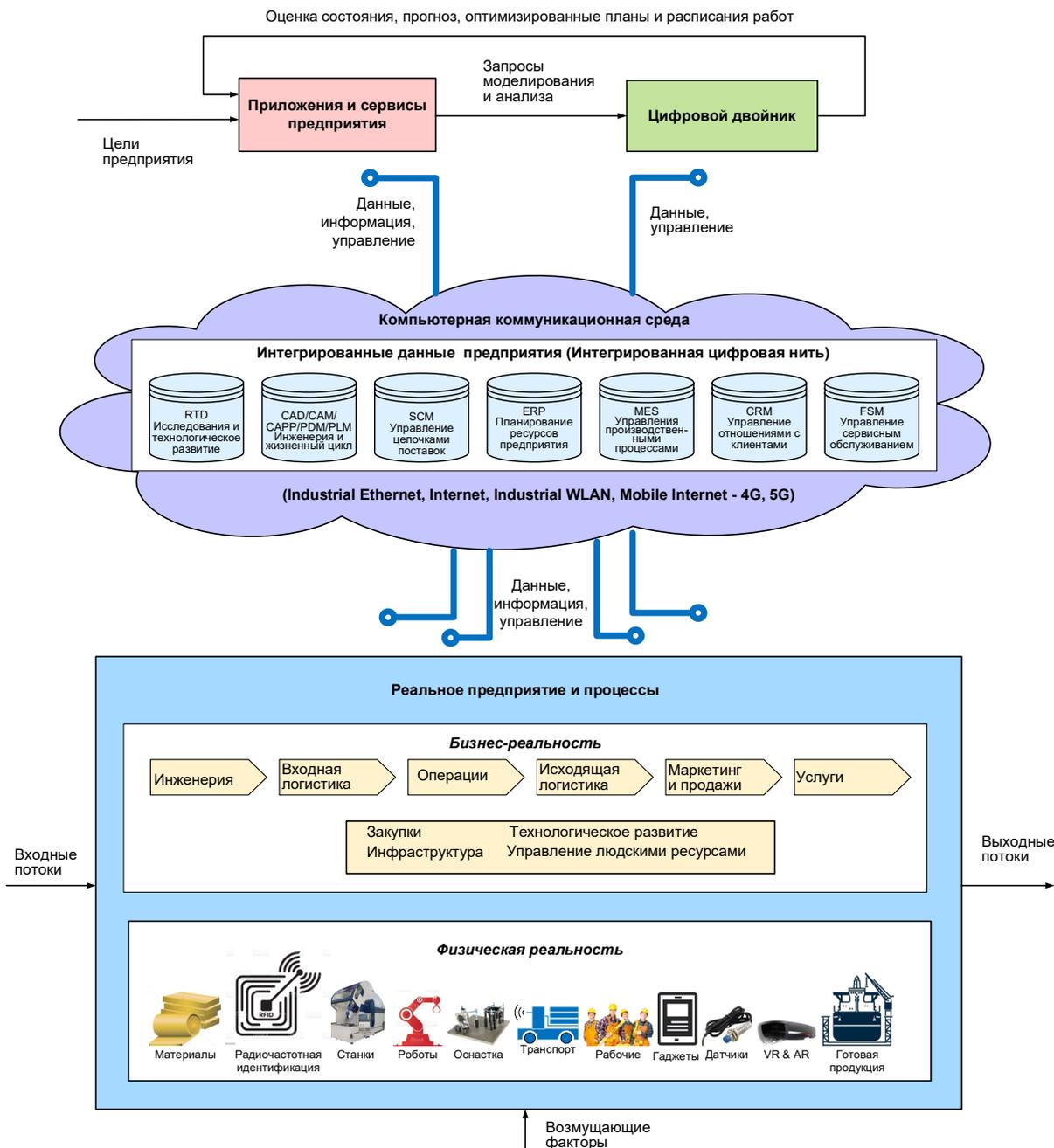
### **3.4. Архитектура цифрового двойника промышленного предприятия**

Обширная область предприятия, рассмотренные теоретические положения парадигмы, а также результаты проведенного анализа возможностей и требований промышленного цифрового двойника позволяют предложить его модель, подходящую для использования во многих реальных промышленных сценариях, как это показано на рис. 1.

Модель образована пятью компонентами: реальное предприятие и его процессы, интегрированные данные предприятия (цифровая нить), приложения и сервисы предприятия, цифровой двойник и компьютерная коммуникационная среда.

Компонент «реальное предприятие и процессы» рассматривает совместно бизнес и физическую реальность. При этом бизнес-реальность подразумевает области предприятия, охватывающие нематериальные и финансовые активы, инженерию, материально-техническое снабжение, производственные операции, маркетинг, продажи, доставку продукции, прогнозирование и управление техническим состоянием, сервисное сопровождение и техническую поддержку. Термин физическая реальность объединяет в себе трудовые ресурсы, продукцию и материальные активы предприятия. Материалы, станки, роботы, оснастка, транспорт, инженерные системы, датчики, приборы визуализации и взаимодействия являются примерами материальных активов предприятия.

Компонент «интегрированные данные предприятия» включает в себя категории данных, логически кластеризованные по областям предприятия, что



**Рисунок 1 - Модель цифрового двойника промышленного предприятия**

соответствует существующей классификации современных интегрированных программных пакетов систем предприятий, а также данные технических и технологических процессов. Как хорошо известно из практики, существующие сегодня на предприятиях данные интегрированными назвать нельзя с точки зрения строгого определения этого термина. Они, скорее, представляют собой отдельные несвязанные островки данных. При этом разрывы между данными наиболее ярко проявляются между организационно-административной и технологической частями предприятия. Логическое объединение всех данных предприятия составляет «цифровую нить», связывающую активы, их



состояние, операции, инженерные конструкции, технологии, поставщиков, клиентов и т.п. в терминах прошлого, настоящего и будущего.

Приложения и сервисы предприятия - это хорошо известные традиционные программные пакеты информационной системы управления предприятия. Они помогают выполнять бизнес-транзакции, наполняя данные предприятия, осуществлять поддержку принятия решений, вырабатывая управляющие установки и информацию, которая визуализируется менеджменту, и, в свою очередь, сама становится частью интегрированных данных цифровой нити. Приложения и сервисы генерируют запросы цифровому двойнику в ходе автоматического решения задач управления или в результате интерактивных действий персонала во время его диалога с системой управления.

Компьютерная коммуникационная среда соединяет реальное предприятие, интегрированные данные, приложения и сервисы и цифрового двойника предприятия. Она создает условия непосредственного взаимодействия этих компонент, осуществляемого путем прямой передачи данных, управления и информации.

Цифровой двойник обеспечивает проведение промышленной аналитики больших данных по запросам приложений и сервисов и передает им полученные результаты в виде оценок состояния, прогнозов, оптимизированных планов и временных графиков. Кроме того, он самостоятельно осуществляет мониторинг данных и управление закрепленными за ним участками физической реальности, передавая результат в виде данных и управления на участки реального предприятия, наполняя при этом цифровую нить данных предприятия.

Промышленная аналитика больших данных цифрового двойника рассматривает модели знаний с поддержкой таких функций как, описательное/прогнозирующее и предписывающее моделирование, обработка сложных событий, генерация предупреждений и триггеров для действий, визуализация генерируемых отчетов [14].

Описательное, прогнозирующее и предписывающее моделирование объясняет прошлое, прогнозирует будущее и рекомендует последующие наилучшие действия с использованием алгоритмов машинного обучения, интеллектуального анализа данных и оптимизации.

Обработка сложных событий (Complex Event Processing, CEP) предлагает функциональность, которая позволяет реализовать сценарии анализа больших данных, требующих обработки в реальном времени. В частности, CEP



контролирует обработку потоковых данных, корреляцию происходящих событий и вычисление показателей достижения успеха (Key Performance Indicators) на непрерывной основе. Руководствуясь предоставленными пользователем бизнес-правилами, CEP генерирует оповещения или триггеры для последующих действий внешних систем.

Генерация предупреждений и триггеров для выполнения действий относится к реализации решений, принятых в результате анализа. Результаты анализа данных, могут инициировать оповещения и действия. Оповещения, в основном, предназначены для дальнейшего рассмотрения людьми. Триггеры предназначены для запуска других приложений или систем, которые автоматически переходят к соответствующим действиям запрограммированных решений.

Многие руководители предприятий могут быть удивлены, узнав, что, если предприятие уже собирает данные о своих продуктах, процессах, людях и других активах, то не требуется больших инвестиций, чтобы поддержать базовую модель цифрового двойника. В дополнение к уже существующей на предприятии цифровой нити взаимосвязанных данных предприятия, можно добавить улучшенные интерфейсные и аналитические возможности, а также, по необходимости, применить другие средства цифровых технологий. Например, компаниям, которые хотят улучшить свой продукт, нужно только доставить данные от датчиков, установленных на образце продукта, в инженерные системы проектирования продукта в формате, совместимом для моделирования.

Модель двойника (рис. 1) системно демонстрирует максимально широкий спектр возможностей при практической реализации этой новой концепции на предприятии. Полная реализация всех ее возможностей на одном предприятии может быть экономически оправданной только в определенных ситуациях, когда полученная экономическая выгода сможет обеспечить возврат требуемых для ее проведения огромных инвестиций. Чтобы достичь успеха, руководство предприятия, его менеджмент и службы ИТ должны пройти весь путь, предписываемый существующими методологиями разработки традиционных информационных систем, история которых восходит к 1980-м годам. Следуя рекомендациям этих методологий, начальным этапом выполнения проекта могла бы стать фаза стратегического планирования предприятия и его цифрового двойника.



## **Выводы**

Цифровой двойник, несомненно, является одним из основных и быстроразвивающихся инновационных направлений, возникающих при проектировании, управлении, планировании и оптимизации на предприятии. Сегодня эта концепция находится на начальной стадии своего развития, и пока нет единодушного мнения о методах ее реализации реальных производственных средах.

В работе рассмотрены и обсуждены аспекты концепции цифровых двойников и их применение в промышленности, предложен метод практической реализации, включающий ключевые требования к возможностям промышленных цифровых двойников и модель цифрового двойника промышленного производственного предприятия. На основе предложенного метода даны рекомендации по созданию и развертыванию цифровых двойников на предприятии.

Предлагаемый метод основывается на совместном рассмотрении концепций цифрового двойника, цифровой нити и текущих ИТ активов предприятий. Это позволяет использовать существующие данные предприятий в качестве основы для поддержки базовой модели создаваемых цифровых двойников на предприятии. Создаваемый цифровой двойник рассматривается как важное расширение текущих ИТ активов предприятий и средство, интегрирующее административно-организационную область и технологические процессы предприятия. При этом цифровой двойник обеспечивает приложения и сервисы промышленной аналитикой больших данных в автоматическом и диалоговом режиме. Он также представляет собой самостоятельное средство для выполнения задач мониторинга на участках предприятия и инициирования оповещений для приложений и сервисов, а также осуществления действий запуска приложений запрограммированных решений или управления технологическими процессами по результатам проведенного им анализа.