

Применение цифровых двойников в промышленности

Сомайе Малакути, Питер Ван Шалквик, Биргит Босс, Челлури Рам Састри (Industrial Internet Consortium)

Эта статья представляет собой практическое руководство по цифровым двойникам, включая определение термина, описание преимуществ, архитектуры, а также необходимых для их реализации элементов. Продемонстрирована связь между системой промышленного Интернета вещей (IIoT) и её двойником с вариантами использования.

Определение цифрового двойника от ИИС

Цифровой двойник – это формальное цифровое представление некоторого актива, процесса или системы, которое фиксирует атрибуты и поведение этого объекта, подходящие для передачи, хранения, интерпретации или обработки в определённом контексте.

Информация о цифровом двойнике включает, помимо прочего, комбинации следующих категорий:

- физическая модель и данные;
- аналитические модели и данные;
- данные временных рядов и ПО, их упорядочивающее;
- транзакционные данные;
- основные данные;
- наглядные модели;
- расчёты.

Значок на рис. 1 отражает несколько аспектов цифрового двойника. Он используется на протяжении всей ста-



Рис. 1. Иконка цифрового двойника

тью для изображения цифрового двойника.

Отношения между цифровыми двойниками в системах

Уровень абстракции цифрового двойника таков, что он соответствует тем вариантам использования, для которых этот цифровой двойник предназначен.

Дискретный цифровой двойник – это единая сущность, которая самодостаточна без необходимости дальнейшего разбиения на цифровые двойники более низкого уровня. Например, редуктор или двигатель шаровой мельницы в горнодобывающей промышленности можно контролировать и создавать отчёты на этом же уровне объекта. Сборка дискретных цифровых двойников для создания составного цифрового двойника показана на рис. 2 в виде вертикального расширения, описывающего увеличение состава от одного до множества объектов.

Составной цифровой двойник – это комбинация дискретных цифровых двойников, которая представляет объект, состоящий из нескольких отдельных компонентов или частей. Композиция может иметь место на разных уровнях. Например, производственная

ячейка – это составной объект, цифровой двойник которого состоит из цифровых двойников устройств внутри производственной ячейки. Весь завод представляет собой систему, цифровой двойник которой состоит из нескольких составных цифровых двойников.

Как показано на рис. 3, отношения между цифровыми двойниками в композиции могут быть следующими.

- Иерархический: как и их реальные аналоги, набор цифровых двойников компонентов может быть собран в цифровой двойник оборудования, набор цифровых двойников оборудования может быть собран в цифровой двойник производственной линии, набор цифровых двойников производственной линии может быть собран в заводской цифровой двойник и так далее.
- Ассоциативный: между цифровыми двойниками существуют ассоциации, как и у их реальных аналогов. Цифровой двойник газопровода связан с цифровыми двойниками оборудования добычи и потребления газа.
- Одноранговые: одноранговые отношения наблюдаются в группе оборудования одного или подобных типов, выполняющего одинаковые или похожие функции. Общий эффект всего оборудования представляет собой простую сумму эффектов, производимых каждым элементом оборудования. Например, на ветряной электростанции группа двигателей ветряной турбины образует композитный цифровой двойник ветряной турбины.

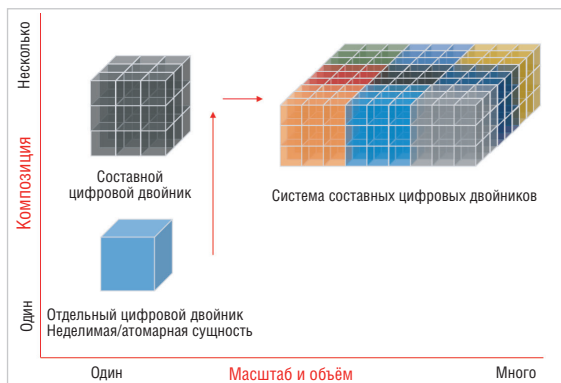


Рис. 2. Создание составного цифрового двойника

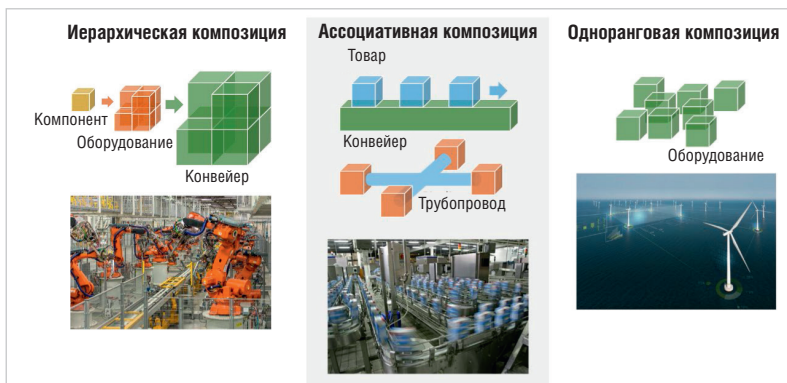


Рис. 3. Связь между цифровыми двойниками в композиции

Цифровой двойник в жизненном цикле сущности

Как показано на рис. 4, информация об объекте обычно разбросана по нескольким источникам информации, которые разрабатываются и поддерживаются разными организациями. Это приводит к нарушению потока информации на протяжении жизненного цикла объекта, поскольку эти источники информации могут не обмениваться информацией должным образом. Некоторая информация может дублироваться или быть непоследовательной, а некоторая информация может отсутствовать. В результате требуется значительное время, чтобы найти соответствующую информацию, преобразовать её в подходящий формат и реализовать в ней семантические отношения. Кроме того, это может привести к противоречивым оперативным данным и к принятию неверных решений. Кроме того, информационные хранилища препятствуют внедрению передовых методов, таких как расширенная аналитика и искусственный интеллект, которые требуют доступа к большому объёму информации.

На рис. 5 показано, как цифровые двойники помогают решить проблему информационного хранилища. Цифровой двойник служит прокси-сервером, который централизованно собирает данные для каждого объекта, а затем делает эту информацию доступной различным областям бизнеса для их конкретных приложений через интеграционные интерфейсы, такие как интерфейсы прикладного программирования (API). Это улучшает процесс принятия решений благодаря общему пониманию рабочего состояния и снижает общие затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание предприятия в течение жизненного цикла.

На рис. 6 показан пример эволюции цифровых двойников в течение жизненного цикла объекта за пределами организации. В производственных системах производитель может добавлять новые типы продуктов в каталог типов. Клиент выбирает типы продуктов, которые он хотел бы приобрести из каталога, а затем размещает заказ. Товар изготавливается и отгружается заказчику. Между тем заказчик может использовать различные инструменты проектирования и виртуального ввода в эксплуатацию для разработки продукта, определения его параметров и вза-

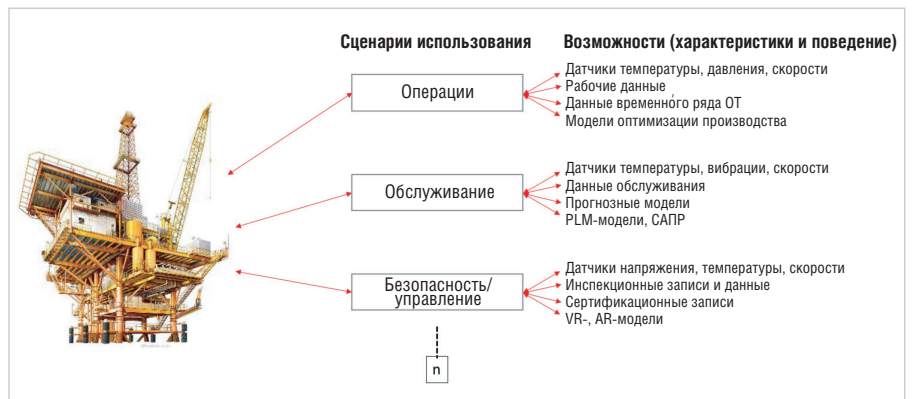


Рис. 4. Операции без цифрового двойника

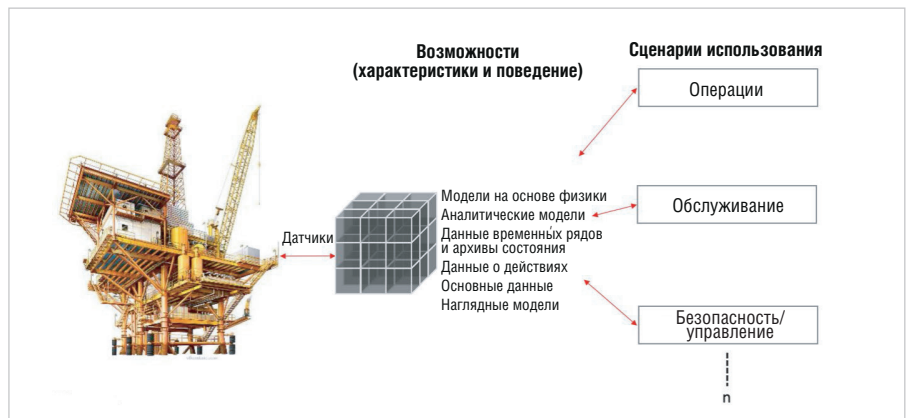


Рис. 5. Операции с цифровым двойником

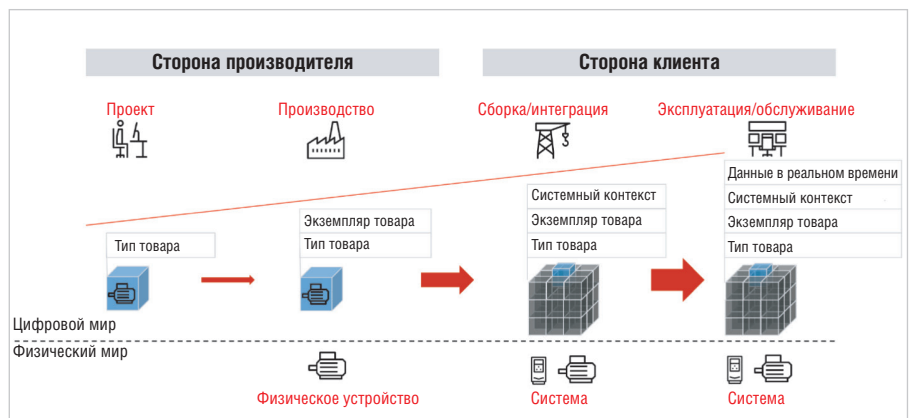


Рис. 6. Цифровой двойник сокращает информационные хранилища

имодействия с другими продуктами на предприятии. Когда реальный продукт получен заказчиком, его виртуальный двойник устанавливается на заводе, проходит производственные циклы и вводится в эксплуатацию. На этапе эксплуатации к продукту могут применяться различные услуги по техническому обслуживанию. Информация о техническом обслуживании может использоваться покупателем для корректировки своего будущего выбора продуктов. Изготовитель может быть проинформирован об обнаруженных проблемах в продукте и использовать эту информацию для дальнейшего повышения качества своего товара.

В приведённом выше простом примере показан поток информации, стирающий границу между производителем и покупателем. Сегодня этот поток в значительной степени нарушен. Например, в одной компании может быть несколько инструментов для выбора, инжиниринга и виртуального ввода в эксплуатацию, которые плохо связаны друг с другом и не могут обмениваться друг с другом информацией. Оперативная информация продукта может храниться в прошивке продукта; информация о техническом обслуживании хранится в специальных базах данных и не связана с этапом выбора. Даже при наличии договорного соглашения

об отправке производителям части информации об эксплуатации и техническом обслуживании эта информация разбросана по базам данных и прошивке продукта, и легко собрать эту информацию экономичным, точным и своевременным образом не представляется возможным.

Цифровой двойник объекта является средством и единым интерфейсом для доступа к информации о его жизненном цикле. Цифровые двойники могут быть определены для любой сущности, представляющей интерес для организации. В нашем примере производитель может определить цифровые двойники для типа продукта, включив всю соответствующую информацию, такую как анализ рынка, чертежи автоматизированного проектирования, документацию и информацию о производительности, полученную от клиента. Они также могут определить цифрового двойника для своего продукта и хранить информацию о производстве и обслуживании, полученную от клиента, в этом цифровом двойнике. Это предоставляет производителю единый интерфейс для доступа ко всей информации о продукте и типе продукта и может быть полезно многим компаниям. Для одного объекта могут существовать отдельные цифровые двойники, поскольку контекст отличается, а информация используется по-разному.

Существуют также семантические отношения между цифровыми двойниками различных сущностей, как и в реальном мире. Неспособность установить их сделала бы некомуникабельного цифрового двойника «информационным бункером» для себя самого. Поскольку информация поступает из разных источников, в разное время и в разных форматах, автоматическое установление таких связей является одной из основных задач при разработке цифровых двойников.

Предлагая единую точку входа для доступа к информации о жизненном цикле объектов и поддерживая отношения между информацией в рамках одного цифрового двойника и между несколькими цифровыми двойниками, можно достичь различных бизнес-преимуществ.

Цифровые двойники могут служить основой для расширенной аналитики и приложений искусственного интеллекта в целях использования и обогащения содержания цифровых двойников. Кроме того, приложения расширенной



Рис. 7. Составляющие цифрового двойника

аналитики и искусственного интеллекта могут быть частью цифрового двойника, что делает его интеллектуальным и автономным объектом.

Не всегда возможно измерить все важные физические параметры, представляющие интерес. Цифровые двойники можно использовать для разработки высокоточных программных датчиков или виртуальных датчиков с помощью физических моделей, встроенных в цифрового двойника и служащих прокси для физических измерений. Может потребоваться расширенная аналитика и моделирование с использованием цифрового двойника основного процесса для прогнозирования будущего поведения.

Измерения, полученные от датчиков, сообщающих о рабочих параметрах актива, не всегда точны из-за отказа или дрейфа в работе датчика. Когда аномалии возникают из-за неисправного датчика, а не из-за какого-либо основного сбоя в работе физического актива, нет необходимости подавать сигналы тревоги и можно избежать ненужных отключений. Физические модели и цифровой двойник, представляющий объект, следует использовать для согласования данных, чтобы повысить качество измерений и гарантировать, что полученные измерения действительно подлинны. Например, в цифровом двойнике электростанции простой баланс массы и тепла в цепи может помочь согласовать данные, а также обнаружить возможные отказы датчиков.

Цифровые двойники облегчают совместную разработку на всех этапах жизненного цикла. Это сокращает время, затрачиваемое на поиск, экспорт и импорт информации в инструменты, необходимые для любой задачи жизненного цикла.

Цифровые двойники могут решить проблемы с эксплуатацией или обслуживанием, которые, в противном случае, привели бы к дорогостоящим простоям.

Цифровые двойники повышают качество, поскольку многие ошибки в производстве вызваны использованием неверной или устаревшей информации.

Цифровые двойники могут быть доступны всем, в любом месте и в любое время. Обмен опытом по всему миру обеспечивает круглосуточное обслуживание и быстрое реагирование при максимальном использовании экспертами. В случае, если внедрение требует работы на месте, может быть привлечён местный инженер, а удалённые эксперты окажут поддержку.

Таким образом, цифровые двойники обеспечивают систематизированную методологию, технологию и инструменты для представления сложных физических и логических сред и позволяют осуществлять эффективный мониторинг, диагностику, прогнозирование и предписание действий физических и логических объектов.

Дизайн цифрового двойника

Для динамического представления объектов в реальном мире экземпляры цифровых двойников должны быть связаны с их соответствующими реальными двойниками, иногда в режиме реального времени, для сбора и организации данных из соответствующих объектов реального мира. Цифровой двойник должен позволить вычислительным и аналитическим моделям анализировать эти данные для описания, диагностики, прогнозирования и моделирования состояний и поведения реальных объектов и систем. Информация, полученная в результате такого анализа, может

быть объединена с бизнес-логикой и целями для определения действий по оптимизации производственных процессов. Чтобы этого достичь, дизайн цифрового двойника должен включать сервисные интерфейсы для интеллектуальных промышленных приложений, обеспечивающих доступ к данным и аналитическим результатам.

Как показано на рис. 7, цифровой двойник включает данные и вычислительные модели (далее просто «модели») и сервисные интерфейсы точно так же, как объект в объектно-ориентированном языке программирования имеет данные – члены, методы и интерфейсы.

Данные: цифровой двойник должен содержать данные о своём реальном двойнике, которые требуются моделям для представления и понимания состояний и поведения реального двойника. Во многих случаях он может состоять из данных о полном жизненном цикле реального объекта, в случае с оборудованием – данных на этапе проектирования (спецификации, проектные модели, производственный процесс и инженерные данные), на этапе производства (данные о работнике, о производственном оборудовании, материалах и деталях, методах производства и способах обеспечения качества), на этапе эксплуатации (данные об установке и конфигурации, текущем и прошлом состоянии, техническом обслуживании), и даже процедурных данных по окончании срока службы. Он также может содержать бизнес-данные, такие как записи транзакций.

Модели: цифровой двойник должен содержать вычислительные или аналитические модели, необходимые для описания, понимания и прогнозирования рабочих состояний и поведения двойников, а также модели, которые используются для предписания действий на основе бизнес-логики и целей в отношении соответствующего объекта реального мира. Эти модели могут включать модели, основанные на физике или химии, инженерные или имитационные модели, модели данных, основанные на статистике, машинном обучении и искусственном интеллекте (ИИ). Он также может включать трёхмерные модели и модели дополненной реальности, помогающие человеку понять рабочие состояния или поведение объектов реального мира.

Служба (интерфейс): цифровой двойник должен содержать набор сервис-

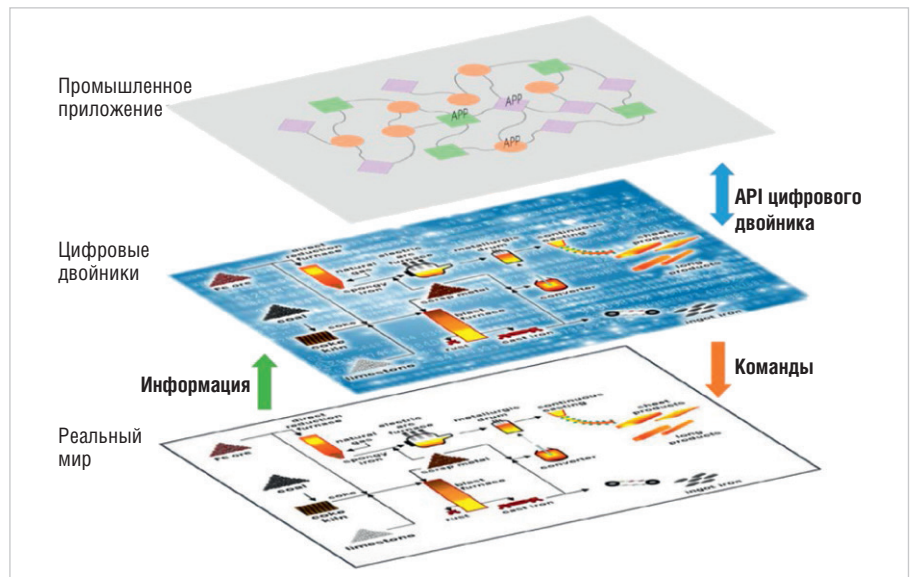


Рис. 8. Цифровые двойники объединяют дизайн и приложения

ных интерфейсов для промышленных приложений или других цифровых двойников для доступа к своим данным и использования своих возможностей.

Хотя форма и содержание объектов реального мира сильно различаются, внутри каждого цифрового двойника должны быть высокоуровневые инвариантные конструкции с некоторыми общими атрибутами данных и моделями, чтобы в их устройстве можно было бы разобраться с помощью общего подхода.

Как показано на рис. 8, мы можем создавать цифровые двойники в соответствии с типами их реальных аналогов. Экземпляры создаются на основе шаблонов их типов при учёте конфигурации присущей этому типу среды. Так мы можем установить логические отношения между экземплярами и соответствующими им типами.

Технические аспекты цифрового двойника

На рис. 9 показаны некоторые технические аспекты цифрового двойника, каждый из которых объясняется ниже.

Информационное моделирование: основным элементом цифрового двойника является информация, связанная с различными фазами жизненного цикла базового объекта. Например:

- метамодель для цифровых двойников, описывающая необходимые внутренние модели для вариантов использования;
- механизмы для структурирования и модуляции контента цифровых двойников и расширения контента, когда новые виды информации становятся



Рис. 9. Технические аспекты цифровых двойников

ся доступными в течение жизненного цикла объекта;

- стандарты, которые необходимо принять для определения структуры и содержания цифровых двойников, чтобы облегчить обмен информацией между компаниями;
- механизмы сопоставления существующей информации с такими стандартами;
- механизмы моделирования отношений между информацией в рамках одного цифрового двойника;
- средства для моделирования различных видов цифровых двойников.

Накопление информации: информация для цифровых двойников поступает из различных источников. Иногда она может извлекаться из самого цифрового двойника. Например, если приложение расширенной аналитики использует контент цифрового двойника в качестве входных данных, приложение может сохранять результаты анализа только в самом цифровом двойнике. Необходимо принять различные ключевые решения относительно переноса информации из

источников информации в цифровые двойники, например:

- получение информации из различных источников, таких как устройства, приложения, базы данных или другие цифровые двойники;
- копирование информации в цифровые двойники или ссылка на информацию из цифровых двойников или их комбинаций по запросу;
- кэширование информации;
- использование онлайн- и офлайн-информации (например, для онлайн-мониторинга реальных объектов или в автономных имитационных тестах).

Синхронизация информации. Здесь следует учитывать следующее:

- средства для синхронизации информации между цифровым двойником и соответствующими источниками информации в обоих направлениях от источника информации к цифровому двойнику и наоборот;
- механизмы синхронизации информации между несколькими цифровыми двойниками, участвующими в различных формах композиции;
- политики (такие как безопасность и частота синхронизации) для выполнения синхронизации информации;
- стандарты и средства обеспечения функциональной совместимости цифровых двойников и их источников информации для облегчения синхронизации информации.

API: цифровые двойники взаимодействуют с другими компонентами. Для облегчения взаимодействия должны быть доступны различные API. Нам нужны API:

- подходящие для различных типов приложений (таких как приложения для моделирования в реальном времени, аналитические приложения и приложения искусственного интеллекта), которые потребляют и заполняют контент цифровых двойников;
- для взаимодействия с другими цифровыми двойниками, возможно, разных поставщиков;
- для взаимодействия с соответствующим базовым объектом для облегчения сбора информации от объекта и контроля над ним;
- взаимодействующие с другими источниками информации для обогащения и синхронизации контента цифровых двойников.

В отношении API-интерфейсов доступа к информации должны быть при-

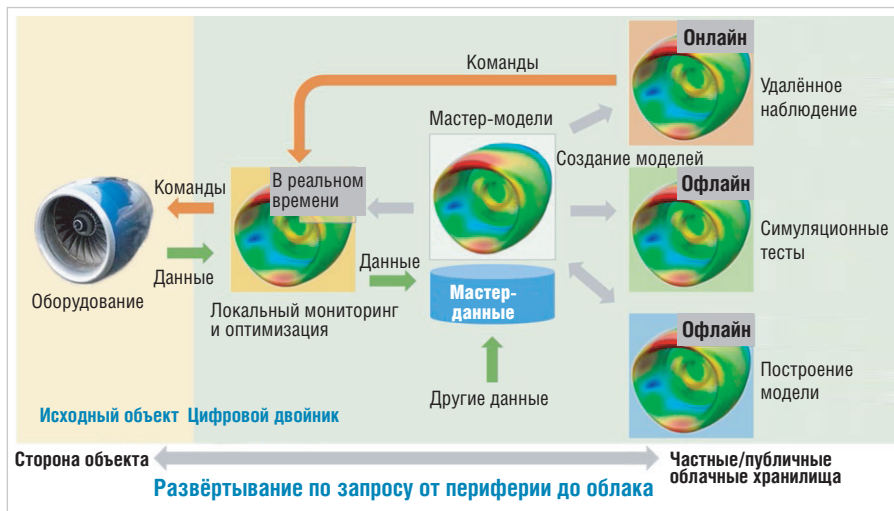


Рис. 10. Модель развёртывания цифровых двойников

няты различные ключевые решения, такие как:

- механизмы офлайн-доступа к информации (например, в виде файлов разных форматов);
- механизмы онлайн-доступа к информации (например, в виде RESTful API);
- механизмы массового или потокового обмена информацией;
- API для взаимодействия на уровне облака, периферии и устройства (например, «облако-облако», «устройство-облако» и «облако-устройство»);
- стандарты для API в целях облегчения взаимодействия между поставщиками.

Подключаемость является ключевым фактором взаимодействия с цифровыми двойниками и между ними. Различные ключевые решения должны быть приняты в отношении подключения. Например:

- механизмы уникальной идентификации цифрового двойника и его базовой сущности для установления связи между ними;
- механизмы автоматического обнаружения базового объекта в сети для установления соединения с его цифровым двойником;
- механизмы обнаружения других цифровых двойников для установления связи между ними;
- стандарты подключения для облегчения взаимодействия между поставщиками.

Развёртывание. Цифровые двойники могут быть развёрнуты в диапазоне от периферии до облака в зависимости от требований приложения. Решение обычно основывается на таких факторах, как:

- требования к задержке и времени отклика;

- интероперабельность и интеграция с другими системами;
- требования к контролю;
- требования к сложности и мощности аналитики.

Для развёртывания цифровых двойников нам нужны механизмы, позволяющие:

- развёртывать содержимое цифрового двойника в таких местах, как устройство IoT, периферия и облако;
- обнаруживать отдельные цифровые двойники, расположенные в разных местах, для формирования составных цифровых двойников;
- обеспечить поддержку полиморфных цифровых двойников, что означает возможность развёртывания цифрового двойника в разных формах и разных местах.

Как показано на рис. 10, один экземпляр должен рассматриваться как главная рабочая копия с его основными моделями, основными данными и соответствующими определениями, которые хранятся и управляются в репозитории. Другие экземпляры можно настроить для различных приложений: например, автономные экземпляры для моделирования и онлайн-экземпляры для удалённого мониторинга. В последнем случае информация будет обновляться по сравнению с её аналогом из реального мира, чтобы отражать достоверные сведения о реальном мире («наземная правда»). Иногда цифровой двойник может быть развёрнут рядом с реальным аналогом для выполнения мониторинга или анализа реального объекта-аналога на месте, чтобы обеспечить обратную связь (почти) в реальном времени для оптимизации работы актива.

Безопасность: взаимодействие цифровых двойников с разными объектами

имеет разные угрозы для безопасности. Необходимо принять различные ключевые решения относительно развёртывания цифровых двойников:

- механизмы для защиты доступа к контенту одного цифрового двойника, например, посредством управления доступом на основе ролей;
- механизмы для безопасного доступа к отдельным цифровым двойникам от разных поставщиков, составляющих сложные цифровые двойники;
- механизмы для обеспечения взаимодействия с базовым объектом через его цифрового двойника;
- методы обеспечения подлинности информации, моделей и других метаданных, таких как идентификационные данные других сторон и их криптографические ключи, а также их права доступа и привилегии;
- методы безопасного развёртывания цифровых двойников и обеспечения выполнения правильных, неизменённых версий программного обеспечения для повышения надёжности решения, которое может помочь защитить интеллектуальную собственность в определённых типах цифровых двойников;
- методы, если это уместно, для помощи в разрешении споров, если потребуется установить происхождение или время получения какой-либо информации.

Интероперабельность – это «способность двух или более систем или приложений обмениваться информацией и взаимно использовать информацию, которая была обменена». Международные стандарты или взаимно согласованные протоколы связи необходимы для определения синтаксиса информации, семантики информации, ожидаемого поведения и политик обмена информацией для обеспечения функциональной совместимости [1]. Необходимо принять различные ключевые решения в отношении аспектов функциональной совместимости цифровых двойников. Например:

- механизмы и стандарты для обеспечения совместимости нескольких цифровых двойников друг с другом;
- механизмы и стандарты для обеспечения взаимодействия различных приложений с цифровыми двойниками;
- механизмы и стандарты для обеспечения функциональной совместимости цифровых двойников с их базовыми объектами;

- механизмы и стандарты для обеспечения функциональной совместимости цифровых двойников с базовыми источниками информации.

Стандарты и практики

Существуют различные мероприятия по стандартизации цифровых двойников, даже если они прямо не называются «цифровыми двойниками». IEC 62832 – это хорошо зарекомендовавший себя стандарт, который определяет структуру цифровой фабрики с представлением активов цифровой фабрики в её центре, хотя он и не называется цифровым двойником. ISO/IEC JTC1 представил отчёт о технологических тенденциях своей объединённой консультативной группы по новым технологиям и инновациям (JETI). В отчёте «Цифровой двойник» был определён как область номер один, требующая углублённого анализа, где JETI также рассматривает возможность налаживания сотрудничества с сообществом открытого исходного кода [2].

В 2019 году Консультативная группа ISO/TC 184 отметила, что в ИСО нет «основанной на стандартах основы для архитектуры данных “цифрового двойника”» [3]. В результате была сформирована группа для изучения формализации цифровых двойников. Кроме того, в 2019 году Ассоциация стандартов IEEE инициировала проект IEEE P2806, целью которого является определение системной архитектуры цифрового представления физических объектов в заводских условиях. Аналогичный подход используется в концепции производства цифровых двойников ISO/AWI 23247 в рамках ISO TC 184/SC4/WG15. Эта структура позволяет использовать PnP для двойных элементов, уделяя основное внимание интерфейсам и функциям цифровых двойников.

Немецкая платформа Industrie 4.0 запустила Asset Administration Shell [4] как реализацию цифрового двойника для интеллектуального производства, IEC PAS 63088. Этому способствовало партнёрство между Францией, Италией и Германией по этому вопросу [5].

ISO TS 18101-1 «содержит требования, спецификации и рекомендации по архитектуре независимой от поставщика промышленной цифровой экосистемы» с упором на функциональную совместимость в нефтегазовой отрасли. В этом контексте цифровой двойник определяется как «цифровой актив, на котором могут выполняться услуги,

представляющие ценность для организации». Цифровые активы не считаются обязательно физическими.

Деятельность с открытым исходным кодом также становится всё более и более популярной. В проекте Eclipse BaSyx [6] предлагаются первые комплекты разработки программного обеспечения (SDK), средства просмотра и редакторы для разработки цифровых двойников, соответствующие спецификации Asset Administration Shell. В рамках Eclipse IoT [7] Eclipse Ditto в сочетании с Eclipse Vorto предлагает универсальную структуру цифровых двойников.

Помимо классических организаций по разработке стандартов (SDO), таких как Международная организация по стандартизации (ISO) и Международная электротехническая комиссия (IEC), другие консорциумы в контексте IoT, такие как W3C Web of Things (WOT), работают над спецификациями цифрового представления вещей.

Цифровой двойник в применении

Цифровой двойник в производстве

Коммерческий самолёт состоит из многих комплектующих, таких как двигатель, шасси и авионика. В результате цифровой двойник самолёта представляет собой композицию двойников этих частей. Авиакомпании – это операторы, которые обычно покупают или арендуют самолёты у компании, отвечающей за все самолёты. В результате ответственность за цифровой двойник самолёта на момент доставки будет нести производитель самолёта. Производитель, в свою очередь, будет полагаться на двойники основных деталей, таких как двигатели OEM-производителя. Эти двойники должны иметь возможность взаимодействовать на одной или нескольких, но совместимых платформах. Со временем эти двойники должны поддерживаться в рабочем состоянии.

Что касается ценности для бизнеса, цифровой двойник самолёта помогает с профилактическим обслуживанием, эффективностью эксплуатации (например, топливной экономичностью) и выработкой стратегий обслуживания активов. Учитывая, что срок службы самолёта часто составляет несколько десятков лет, а стоимость обслуживания в течение всего срока службы может превышать первоначальную стоимость самолёта, наличие циф-

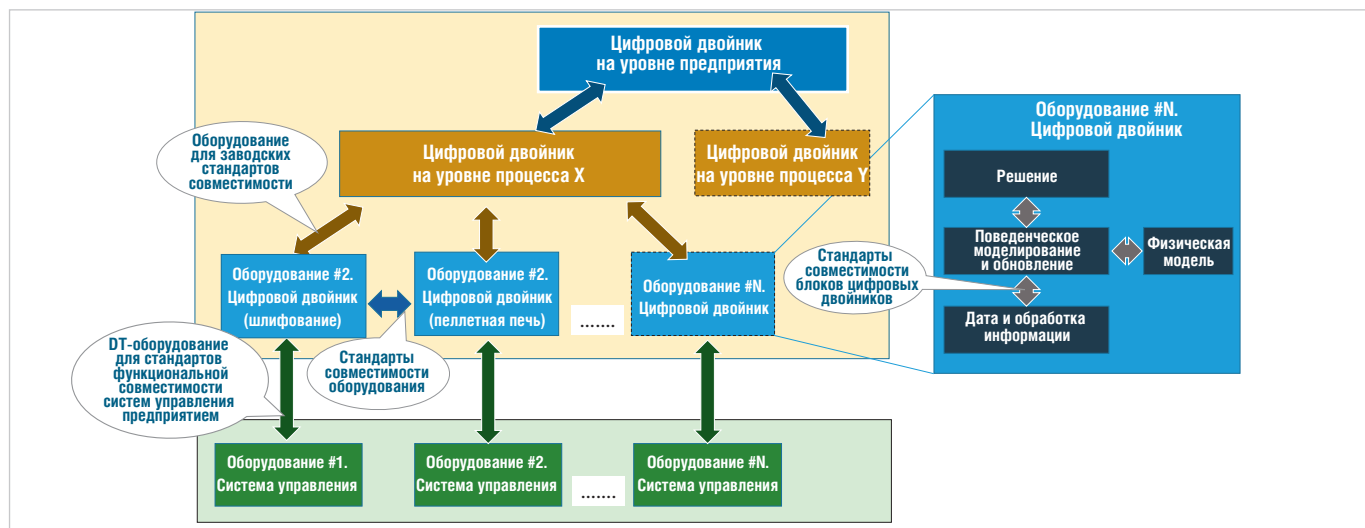


Рис. 11. Цифровой двойник в процессе укладки на поддоны

ровых двойников является решающим преимуществом.

Цифровой двойник в энергетике и ЖКХ

В процессе окомкования эффективный контроль печного оборудования и установки необходим для достижения высокого уровня производительности печи, энергоэффективности и соответствия требованиям качества.

Как показано на рис. 11, цифровой двойник печи для окомкования работает в тандеме с распределённой системой управления предприятием. Затем этот цифровой двойник используется для непрерывной оптимизации работы в режиме реального времени, предлагая оператору оптимальные установки. Цифровой двойник включает в себя предварительную обработку данных и информации, имитационную модель поведения оборудования (как на основе данных, так и на основе расчётов физики), а также самообучающиеся модули и решения (которые оптимизируют входные данные с учётом ограничений процесса, качества, безопасности и окружающей среды). Цифровой двойник использует как программные модели, основанные на данных более 7000 датчиков, так и физические сенсоры для прогнозирования неизвестного расхода, температуры и состава рециркулируемых газов.

Цифровые двойники для сталелитейного завода будут включать:

- цифровой двойник на уровне оборудования, который управляет каждой единицей оборудования;
- подблоки, которые позволят использовать цифровой двойник на уровне оборудования здания;

- связь между цифровыми двойниками и существующими системами управления;
- цифровой двойник на уровне процесса, который будет управлять оборудованием в рамках процесса;
- цифровой двойник на уровне завода, который будет контролировать все операции завода.

При рассмотрении требований к интероперабельности необходимо учитывать стандарты интероперабельности для связи между блоками, как поясняется ниже.

В этом сценарии цифровые двойники приносят следующие преимущества для бизнеса:

- оптимизация в режиме реального времени контролирует ключевые параметры управления, обеспечивая снижение расхода топлива на 2% и улучшение производительности на 3%;
- вычисление в режиме реального времени различных параметров качества, таких как прочность на сжатие окатышей, и рабочих параметров печи, таких как температура слоя, помогает операторам принимать быстрые и точные решения без необходимости проведения лабораторных пробных испытаний.

Цифровой двойник в нефтегазовой сфере

Цифровой двойник подземного мониторинга скважины для жизненного цикла нефтяной скважины начинается на этапе разведки, когда при запуске скважины используются имитационные модели, основанные на сейсмических и других геологических данных. Цифровой двойник мони-

торинга подземных скважин представляет собой составную систему; модель бурения состоит из четырёх уникальных независимых элементов, каждый из которых представляет собой составной цифровой двойник. Это недра, ствол скважины, буровая установка и наземное оборудование. Недра, в свою очередь, включают в себя окружающую геологию, коллектор и околоскважинные образования. Чтобы получить целевые функции для выполнения во время строительства скважины, эти четыре интегрированных первичных элемента данных являются примерами того, что необходимо смоделировать:

- траектория ствола скважины;
- физика бурильной колонны;
- контроль давления (свойства бурового раствора);
- состав и целостность коллектора (вблизи ствола скважины).

Мониторинг скважин и датчики буровой установки в сочетании с возможностями искусственного интеллекта резервуара, которые сканируют огромные объёмы геологических и исторических данных о добыче в экземпляре цифрового двойника, обеспечивают оперативный контроль и взаимодействие между подземным резервуаром и наземными сооружениями. Цифровой двойник мониторинга подземных скважин развивается в течение жизненного цикла скважины, чтобы учитывать дополнительные варианты использования в процессе добычи, обслуживания и ликвидации.

Цифровой двойник для мониторинга подземных скважин предлагает следующие преимущества для бизнеса.

- Он обеспечивает механизм оценки стратегий по снижению затрат, оптимизации эксплуатации скважин и добычи ископаемых. Эти цифровые

двойники обеспечивают лучшее понимание финансовых, технических и эксплуатационных параметров для управления скважинами в режиме реального времени.

- Цифровой двойник подземного мониторинга скважин может улучшить общий индекс целостности скважин и процессы строительства скважин, поддерживая разработку эффективных и гибких рабочих процессов строительства скважин и облегчая принятие решений в отношении наиболее выгодных альтернатив разведки, бурения и добычи.

Цифровой двойник в горной работе

Цифровой двойник для горнодобывающей деятельности с упором на состояние обрабатываемых активов включает информацию, необходимую для принятия наилучших решений в отношении технического обслуживания, будь то на основе состояния или на основе прогнозов. Кроме того, он предоставляет информацию для определения приоритетов планирования рабочих заданий на основе параметров и показателей фактического состояния активов.

Цифровой двойник состояния обрабатываемых активов используется во всём бизнесе, и поэтому ему требуется доступ к различным системам, чтобы гарантировать, что отображаемая информация является точной и актуальной для актива и уровня детализации, который интересует пользователя.

Этот цифровой двойник взаимодействует:

- с системами управления активами предприятия (EAM);
- локальным архивариусом и архивариусом всего предприятия;
- IT-системой заказчика;
- существующими системами управления.

В этом сценарии цифровые двойники приносят следующие преимущества для бизнеса.

- Возможность улучшить среднее время безотказной работы в соответствии с методами управления эффективностью активов рудника. Это достижимо благодаря тому, что информация привязывается к реальному времени сильнее, чем это было возможно ранее. Вместе с ключевой информацией из системы EAM различная системная информация объединяется в цифровом двойнике, что

помогает принимать ключевые решения.

- Они реализуют весь потенциал рудников, чтобы свести к минимуму потери предприятия из-за проблем с обслуживанием оборудования.
- Их применение повышает точность планирования, что, в свою очередь, способствует переходу к мониторингу, в большей степени основанному на состоянии, и, в конечном счете, к прогнозному мониторингу активов.
- Это снижает общую стоимость за счёт большей прозрачности состояния активов и графиков технического обслуживания.

Цифровой двойник в автоматизации процессов

Цифровой двойник партии химического продукта объединяет всю необходимую информацию о партии продукта. Интересующая информация представляет собой производственные параметры (такие как температура, давление и влажность) во время производства конкретной партии.

Цифровой двойник предоставляет информацию для мониторинга соответствующих аспектов (вязкость, значение pH и агрегатное состояние) текущего состояния продукта. На основе этих данных можно проводить моделирование в целях прогнозирования оптимальных производственных параметров дальнейших этапов обработки, чтобы гарантировать запланированное качество продукта.

Изменения в свойствах продукта могут быть зарегистрированы в базе данных временных рядов, что позволяет отследить превышение критически важных для качества значений до времени и места и, таким образом, определить причину таких изменений. Эти функции делают цифровой двойник продукта ключевой частью процесса управления качеством.

Поскольку цифровой двойник партии химического продукта даёт представление об истории данных этой партии, он может быть доставлен покупателю в дополнение к реальному продукту. Собранные данные помогают клиенту на дальнейших этапах обработки или конечного использования.

В этом сценарии цифровые двойники приносят следующие преимущества для бизнеса.

- Прозрачность и прослеживаемость производственных параметров мо-

гут использоваться в регрессных явлениях.

- Плохое качество продукции может быть обнаружено напрямую, что предотвратит выполнение дальнейших дорогостоящих производственных операций.
- Анализ качества продукции и предстоящих производственных параметров позволяет получить дополнительные знания о производстве.
- Общее качество продукции может быть улучшено за счёт интеллектуального моделирования производственных параметров.

Заключение

Хотя большинство компаний предлагают использовать цифровые двойники как часть своей стратегии по развитию Интернета вещей, понятие цифровых двойников существовало до IoT под другими именами и определениями. В результате появились разные интерпретации цифровых двойников, обусловленные вариантами использования, в которых цифровые двойники играют определённую роль. Несмотря на то что набор решений, с которыми сталкиваются архитекторы при проектировании различных цифровых двойников, пересекается, такое различное понимание цифровых двойников является препятствием введению общих абстрактных архитектур для цифровых двойников и их положению в промышленных системах.

В этой статье был сделан шаг к тому, чтобы дать конкретное определение цифрового двойника с точки зрения промышленного интернет-консорциума (IIoT), и рассмотрены сценарии, в которых цифровой двойник играет важную роль в повышении эффективности текущих вариантов использования и обеспечении возможности появления новых. Перечисленные технические аспекты и решения по проектированию цифровых двойников закладывают основу для дальнейшей работы по включению цифровых двойников в Эталонную архитектуру промышленного Интернета (IIIRA). Поскольку безопасность и функциональная совместимость являются двумя важными качественными характеристиками цифровых двойников, будет проведена дальнейшая работа по предложению средств для реализации этих характеристик.

