

Анализ подходов архитектурного проектирования цифровых двойников

Д.А. Гапанович, В. А. Тарасова, В. А. Сухомлин, В. П. Куприяновский

Аннотация — современный подход к созданию и эксплуатации сложных объектов (физических активов, таких, как, например, технические системы, производственные процессы, компании, цеха, машины и т.п.) предполагает использование их полномасштабных цифровых моделей, получивших название цифровых двойников (Digital Twins - DT). С помощью таких двойников осуществляется сбор всей существенной информации об активах и обеспечивается отображение в реальном времени их состояния и динамических характеристик, а также, благодаря зеркальной информационной связи между двойниками и активами, предоставляется возможность манипулирования активами через их цифровые представления. Таким образом DT становятся эффективным инструментом поддержки принятия решений по управлению активами. К одной из ключевых задач процесса разработки столь сложных цифровых моделей, а какими являются DT, относится задача выбора системной архитектуры DT. Учитывая, что двойники могут включать в свой состав многочисленные приложения и сервисы, инструменты сотрудничества с окружающей средой, а также поддерживать возможности своего функционального расширения, важным аспектом при выборе архитектурных решений становится свойство открытости DT, т.е. соответствие стандартам. В статье приводится анализ архитектурных решений, предлагаемых для создания цифровых двойников сложных технических и производственных систем, при этом основное внимание уделяется стандартам.

Ключевые слова—двойник, интероперабельность, Индустрия 4.0, промышленное производство, интернет вещей, интероперабельность, стандартизация, метамодели, базовые онтологии

1. ВВЕДЕНИЕ. КОНЦЕПЦИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Для современной экономики, вступающей в эпоху Индустрии 4.0, характерной тенденцией является массовый переход промышленных предприятий к технологиям интеллектуального производства, основанного на многомерном высокоточном моделировании свойств и процессов функционирования активов и использовании интеллектуальных методов принятия решений для оптимизации и расширения производства.

Одной из центральных парадигм цифровизации активов в производственной деятельности служит концепция цифрового двойника (Digital Twin - DT), которая предполагает, во-первых, высокую степень сходства между физическим активом и его цифровым или виртуальным представлением, т.е. двойником, и, во-вторых, наличие по существу зеркальной информационной связи в реальном времени между ними, превращающую актив в целостную киберфизическую систему (Cyber-Physical System - CPS), с возможностью управления ею, как на физическом, так и виртуальном уровнях.

Понятие цифрового двойника было введено в 2002 году Майклом Гривсом для описания идеальной цифровой модели актива, специально разработанной с учетом жизненного цикла актива [1]. В последствие понятие DT постоянно уточнялось. Но все определения DT включали три ключевых аспекта этого понятия:

- сам физический актив (a physical asset),
- его цифровое представление (a digital representation)
- зеркальную связь между ними (a mirror-like connection between the two.), которая считается важнейшей особенностью цифровых двойников [2].

В данной работе будем ориентироваться на определение цифрового двойника, данное в работе[3]: «Высококачественная виртуальная копия физического актива с двусторонней связью в реальном времени для целей моделирования и поддержки принятия решений, способствующих улучшению обслуживания актива».

DT представляют собой сложные многофункциональные система, с помощью которых моделируется жизненный цикл актива и осуществляется взаимодействие с приложениями, поддерживающими принятие решений по управлению активом.

В связи с чем при проектировании DT одной из центральных задач является разработка его архитектуры.

Существуют весьма обстоятельные обзоры работ по теме цифровых двойников, в частности [4, 5, 6]

Однако аналитических обзоров, посвященных сравнительному анализу архитектурных решений при создании DT пока недостаточно.

При разработке цифровых двойников с длительным жизненным циклом, когда окружающая их экосистема эволюционирует благодаря процессам всеобщей цифровизации, к создаваемым двойникам могут предъявляться требования максимальной функциональной совместимости с сервисами и приложениями окружения. В этом случае для обеспечения свойства открытости двойники и их архитектурные решения должны разрабатываться на

Статья получена 17 марта 2021.

Д.А. Гапанович - МГУ имени М.В. Ломоносова (email: dim.gapanovich@gmail.com)

В.А. Тарасова - МГУ имени М.В. Ломоносова (email: tarasova.valeria.2000@gmail.com)

В.А. Сухомлин - МГУ имени М.В. Ломоносова (email: sukhomlin@mail.ru)

В.П. Куприяновский - МГУ имени М.В. Ломоносова (email: v.kupriyanovsky@rut.digital)

основе использования международных стандартов. Для активов и их двойников, среда функционирования которых определена и фиксирована, могут использоваться проприетарные и другие решения, обеспечивающие их требуемую функциональность.

При разработке цифровых двойников с длительным жизненным циклом, когда окружающая их экосистема эволюционирует благодаря процессам всеобщей цифровизации, к создаваемым двойникам могут предъявляться требования максимальной функциональной совместимости с сервисами и приложениями окружения. В этом случае для обеспечения свойства открытости двойники и их архитектурные решения должны разрабатываться на основе использования международных стандартов. Для активов и их двойников, среда функционирования которых определена и фиксирована, могут использоваться проприетарные и другие решения, обеспечивающие их требуемую функциональность.

С учетом выше сказанного в данной статье в первую очередь рассмотрим решения по разработке архитектур двойников на основе использования международных стандартов, при этом заметим, что разработка таких стандартов еще далека от своего завершения.

Далее в статье рассмотрены ряд наиболее интересных с нашей точки зрения предложений по разработке архитектур для DT в разных областях применения, которые могут оказаться полезными при создании DT физических активов.

В заключение дан сравнительный анализ рассмотренных решений.

II. ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК И ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ - СОВРЕМЕННЫЕ СТАНДАРТЫ

Работа [7] посвящена изучению текущих стандартов ключевых технологий Индустрии 4.0, а именно, цифровых двойников (DT) и Интернета вещей (IoT), с целью выявления совпадающих аспектов или расхождений соответствующих стандартов. Одним из результатом исследования стала предложенная авторами схема классификации рассматриваемых стандартов. Также авторами предложен согласованный набор стандартов для элементов, из которых должен состоять DT, включая форматы сериализации и сетевых протоколов. В работе рассматриваются и открытые темы, такие, как, например, стандартизация языка запросов и форматов представления геопространственных, временных и исторических данных.

Стандартизация технологий DT и IoT, как и других технологий Индустрии 4.0, является фундаментальным аспектом, от которого зависит успешное развитие цифровой экономики, так как только на этом пути можно достичь функциональной совместимости или интероперабельности множества цифровых и физических решений, которая должна рассматриваться в глобальном масштабе.

Ряд авторитетных организаций стандартизации ведут разработку стандартов в области IoT и DT, в частности, это Европейский институт телекоммуникационных

стандартов (ETSI), Международная электротехническая комиссия (IEC), Инженерная группа Интернета (IETF), Консорциум промышленного Интернета (II), ISO, Open Geospatial Consortium, Plattform Industrie 4.0, World Wide Web Consortium (W3C) и другие.

В цитируемой работе рассматриваются стандарты, которые сосредоточены на трех основных аспектах, общих для IoT и DT, а именно, на описании ресурсов или активов, функциях их обнаружения и доступа к их свойствам. При этом под ресурсами в контексте IoT понимаются устройства, датчики, исполнительные механизмы или машины, а под активами, в контексте DT – устройства, физические или виртуальные объекты, процессы или системы. А целью работы является выявление того, насколько хорошо текущие стандарты как из области IoT, так и из области DT согласованы в отношении этих трех базовых аспектов обеих технологий - описания ресурсов, обнаружения описаний и доступа к ресурсам. При этом как в IoT, так и в DT считается, что коммуникация между ресурсами должна происходить в основном без взаимодействия с человеком, то есть машина-машина (M2M).

Для того, чтобы организовать M2M-взаимодействия, требуется формальное представление взаимодействующих ресурсов/активов. В связи с чем первым шагом является создание описания ресурса с помощью некоторого языка или (мета) модели, представляющего некоторую модель ресурса и определяющего возможности ресурса и его интерфейсы для доступа к нему других ресурсов. После того, как описание ресурса создано, оно может быть обнаружено некоторым потребителем, который может считать данное описание и извлечь из него информацию о доступе к возможностям ресурса.

В работе рассмотрено основание классификации стандартов в виде иерархии метамodelей для IoT и DT, которое определено с помощью базовой концепции многоуровневого метамodelирования Object Management Group (OMG) [8]. Такой способ классификации показан на Рис. 1.

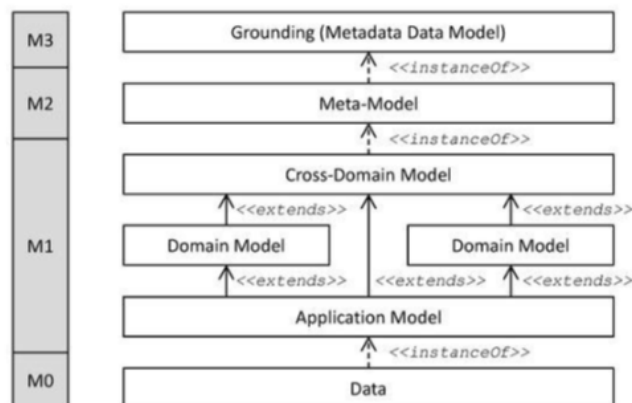


Рис. 1. Иерархия метамodelей, основанная на принципах многоуровневого метамodelирования OMG с расширенным слоем M1, отражающим иерархическую организацию моделей, типичную для Интернета вещей и цифровых двойников [7].

Стандарты в области цифровых двойников для Интернета вещей разрабатывают два отраслевых консорциума: Plattform Industrie 4.0 (это немецкая стратегическая инициатива, направленная на поддержание лидерства Германии в Индустрии 4.0) и консорциум промышленного Интернета (II). Оба консорциума сотрудничают над согласованием своих спецификаций, так как концепция цифровых двойников является ключевым фактором для различных сценариев использования IIoT и Индустрии 4.0.

Сравнение эталонных архитектурных подходов консорциумов приведено в работе [9].

Собственно проблематика DT развивается консорциумом Plattform Industrie 4.0 в рамках концепции оболочек управления активами (Asset Administration Shell), она ориентирована прежде всего на воплощение концепции DT на фабриках и промышленных предприятиях [10, 11]. Модель оболочки цифрового двойника представлена на Рис. 2.

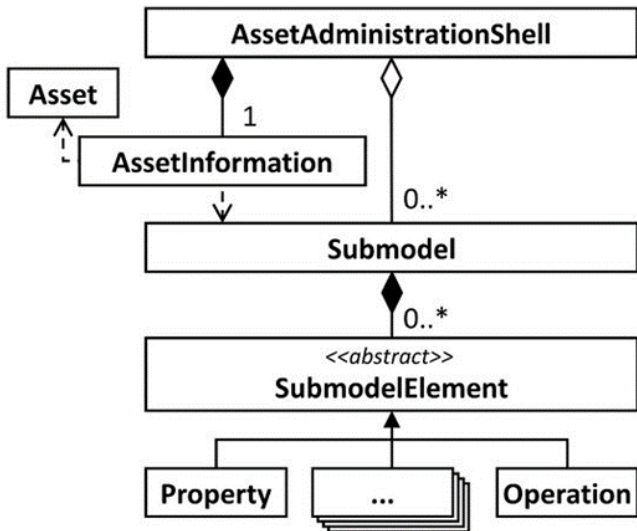


Рис.2. Модель AAS с его подмоделями [10].

Как видно из Рис.2, основными частями AAS являются:

- метаданные (информация) об активе, который они представляют
- подмодели, представляющие определенный аспект, связанный с активом, и вариантами его использования, которые должны поддерживаться AAS.

Как отмечалось выше, начальным шагом в стандартизации DT является стандартизация описания активов. На Рис. 3 представлена модель описания оболочки двойника средствами UML-нотации[12].

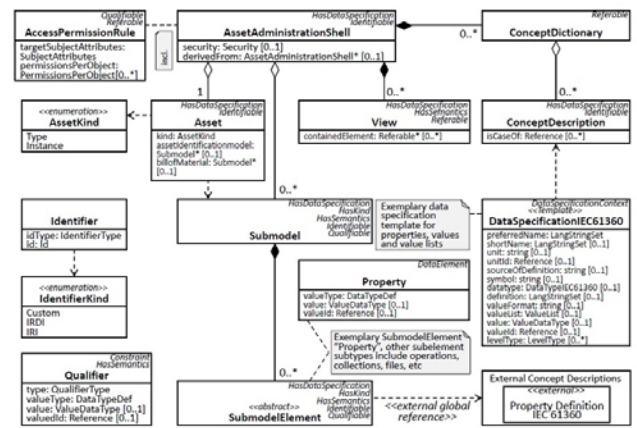


Рис. 3. Диаграмма классов, изображающая метамодель концепции AssetAdministrationShell, разработанной Plattform Industrie 4.0 (на основе рисунка 11 из [12])

III. СЕТЬ ВЕЩЕЙ ГРУППЫ W3C WEB OF THINGS (WoT)

Своей задачей рабочая группа W3C Web of Things (WoT) ставит разработку типовых строительных блоков, которые должны дополнять и улучшать уже существующие стандарты. Примером такого строительного блока является официальная рекомендация W3C WoT Thing Description (WoT TD) [13, 14].

WoT TD предоставляет метамодель для описания существующих ресурсов в IoT, называемых вещью (Thing). Примером такой вещи может служить DT.

В документе [13] описана формальная модель и общее представление для Web of Things (WoT). Описание вещи, основанное на небольшом словаре, включает метаданные и интерфейсы вещей, где вещь представляет собой абстракцию физического или виртуального объекта, который обеспечивает взаимодействие с сетью вещей.

Описания вещей по умолчанию кодируются в формате JSON, который также позволяет обрабатывать JSON-LD, обеспечивающий основу для представления знаний о вещах с помощью семантических ссылок. Экземпляр описания вещи может размещаться на самой вещи или размещаться на внешнем хосте, когда вещь имеет ограничения ресурсов.

В качестве примера на Рис. 4 показана вещь, состоящая из набора свойств (которые могут быть доступны только для чтения или чтения / записи), действий, то есть методов, которые могут быть вызваны на вещи, и событий.

Система типов основана на JSON с дополнительной поддержкой добавления ограничений, например, в виде регулярного выражения для строк в соответствии со схемой JSON.

WoT TD используют идентификаторы на основе URI с возможностью сериализации посредством JSON-LD, JSON или RDF.

Следует отметить, что в WoT TD, используя технологию семантической паутины, можно легко добавить семантическую информацию к каждому аспекту TD.

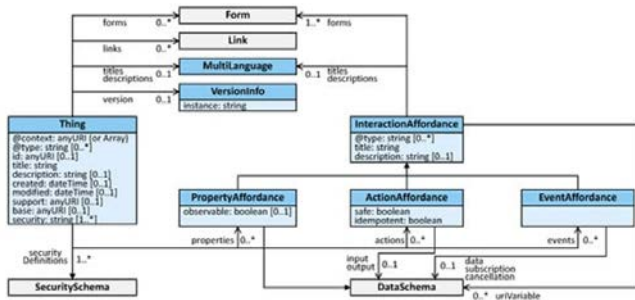


Рисунок 4. Диаграмма классов, изображающая метамодель Web of Things Thing Description (на основе рисунка 1 из [13]).

В отличие от других стандартов, в спецификации WoT TD не определяет API для доступа к свойствам ресурса, предлагается метамодель для описания конкретных API.

IV. АРХИТЕКТУРА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА, ОСНОВАННАЯ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ

В работе [15] авторами предлагается архитектура DT, использующая технологии Промышленного Интернета вещей (IIoT) для сбора информации от датчиков физического двойника (physical twin - PT) или актива и управления его приводами, реализуемые через платформу Унифицированной архитектуры связи (OPC UA) [16].

Основой платформы OPC UA служит протокол межмашинной связи, который обеспечивает подключение и совместимость устройств с различными сетевыми протоколами. OPC UA поддерживает сервис-ориентированную архитектуру и расширяемость создаваемых на его основе приложений [17]. Архитектура рабочего места двойника иллюстрируется на Рис. 5.

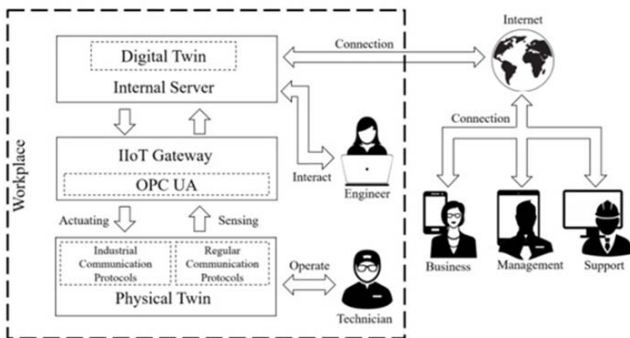


Рисунок 5. Архитектура рабочего места цифрового двойника.

Показанная на Рис.5 архитектура рабочего места цифрового двойника содержит три основных элемента:

- физический двойник PT (актив) и его производственные процессы, которые обмениваются данными по обычным и промышленным протоколам связи,
- внутренний сервер, компьютер, на котором работает цифровой двойник и симуляторы, обеспечивающие подключение внутри и за

пределами рабочего места.

- шлюз Интернета вещей, который обеспечивает перекрестную связь между активом PT и внутренним сервером.

На внутреннем сервере предлагается использовать два вида DT. Один из них используется внутри рабочего места, где DT работает с критическими операциями и содержит более подробную информацию о процессах, а другой DT работает за пределами рабочего места, где информация о процессах, предложении и спросе может отображаться в зависимости от интересов удаленных пользователей.

Как уже упоминалось, в этой архитектуре для сбора информации от PT и управления им используется стандарт OPC UA для удовлетворения требований к обмену данными в промышленных системах. Шлюз объединяет данные в рамках OPC UA-файла расширяемого языка разметки (XML) для высокоуровневой связи между различными уровнями, поскольку XML-файл обеспечивает простую структуру для обработки данных на разных устройствах.

Для демонстрации работоспособности такой архитектуры авторами создан прототип системы PT-DT, в которой информация о PT и его окружении собирается на одноплатном компьютере, используемом в качестве шлюза, структурирующего данные в XML-файл OPC UA для загрузки на внутренний сервер, где запущено приложение DT. Это приложение имеет две панели доступа. Первая из них работает внутри рабочего места двойника и представляет собой наиболее точную цифровую модель PT, обеспечивающую более точный мониторинг состояния PT и надежное управление им. Вторая - обслуживает внешних по отношению к рабочему месту пользователей, поддерживая инструменты принятия решений на основе информации о производственных процессах актива. В прототипе каждое устройство интернета вещей собирает информацию с датчиков, а затем синхронизирует собранные данные под одной и той же меткой времени с другими устройствами IIoT в сети. Обеспечение синхронизированной работы в режиме реального времени вещей IIoT реализуется на основе протокола ZigBee [18].

V. СИСТЕМНАЯ АРХИТЕКТУРА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

В исследованиях цифровых двойников вводится понятие интегрированного (или полного) цифрового двойника, в котором объединяются все приложения цифровых двойников в единую архитектуру. На Рис. 6 представлена типовая высокоуровневая архитектура системы DT, предложенная в работе [19].

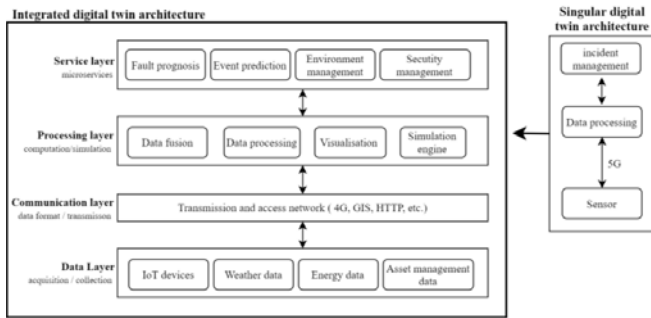


Рисунок 6. Интегрированная (полная) архитектура цифрового двойника.

Предложенная архитектура образует модульную конструкцию и состоит из следующих уровней приложений и функциональных блоков цифровых двойников:

- уровень данных (устройства IoT, атмосферные данные, энергетические данные, данные состояния активов)
- уровень коммуникаций (4-5G, GIS, HTTP и пр.)
- уровень обработки (интеграция данных, обработка данных, визуализация, движок моделирования)
- уровень сервисов (прогнозирование отказов, предсказание событий, управление окружающей средой, управление безопасностью, управление транспортировкой и т.п.).

Благодаря интеграции приложений такой цифровой двойник обладает функциональной полнотой, за счет модульной конструкции характеризуется способностью к масштабируемости, имеет повышенную надежность. Кроме того, интегрированные цифровые двойники обеспечивают дополнительную информацию о поведении системы, поскольку они учитывают взаимосвязь между подсистемами и процессами [20].

В работе [21] для управления данными интегрированной системы мониторинга туннелей предложено использовать расширение рассмотренной архитектуры введением дополнительного уровня, предназначенного для настройки системы на конкретные цели и конечных пользователей. Такой дополнительный системный уровень включает «составные службы» для конкретных конечных пользователей. Дополнительный системный уровень показан на Рис.7.

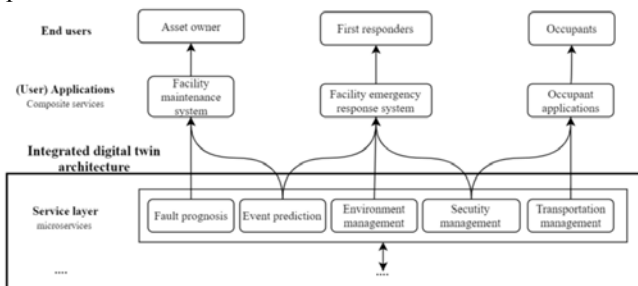


Рисунок 7. Модель уровня сервисов в интегрированной архитектуре DT туннельного актива [21].

Уровень услуг - это верхний уровень интегрированного цифрового двойника. Он относится к программным функциям, таким, как, например, поиск указанной

информации или выполнение операций. Услуги не основаны на контексте, «получение указанной информации» - это услуга, которая может применяться ко многим различным участникам и активам. Услуги цифровых двойников являются вспомогательной функцией для контекстно-зависимых (context based) приложений. Несколько сервисов могут быть объединены для конкретных приложений, и сервисы могут быть повторно использованы для разных приложений, в зависимости от соответствующего контекста и требований.

В работе [22] сервисы классифицируются как службы, связанные с мониторингом, прогнозированием или контролем.

В отличие от сервисов, приложения в значительной мере зависят от контекста, т.е. от прикладной области. Интегрированные DT сложных активов (систем систем) состоят из наборов взаимосвязанных цифровых двойников активов (оборудования, зданий, объектов производства), цифровые двойники сетей связи цифровых двойников активов и их пользователей, а также двойников процессов автоматизации использования активов.

VI. ЯЗЫК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Язык определения цифровых двойников (DTDL) [23] разработан Microsoft и используется в различных продуктах их служб Azure. Хотя DTDL не разработан организациями стандартизации, здесь упоминается, потому что он уже используется во многих коммерческих решениях, предлагаемых Microsoft, как IoT Hub, IoT Central и Azure Digital Twins. Как следует из названия, DTDL охватывает только аспект описания ресурса и не касается обнаружения ресурсов и доступа к ним. Существует две версии: версия 1 и версия 2. Если не указано иное, в этом документе мы ссылаемся на версию 2.

В DTDL ресурсы называются интерфейсами и могут содержать набор телеметрии, свойств, команд, взаимосвязей и компонентов, как показано на рисунке 8. Для идентификации ресурсов и их элементов DTDL использует специальную форму URI, называемую идентификатором моделирования цифрового двойника (DTMI) вида <схема>: <путь>; <версия>. Телеметрия описывает данные, получаемые от датчиков ресурса в виде потока данных. В общих условиях это соответствует комбинации событий и подписки на активы. Команды соответствуют функциям, которые можно вызывать с дополнительными параметрами ввода и вывода. Компоненты представляют собой концепцию, аналогичную подмоделям в AAS, обеспечивая способ структурирования функциональности в повторно используемых блоках. DTDL использует схему настраиваемого типа, называемую языком определения схемы цифрового двойника, которая совместима с популярными форматами сериализации, включая JSON, Avro и Protobuf. Также поддерживается взаимосвязь ресурсов посредством явного моделирования отношений, включая минимальную / максимальную

мощность. DTDL также поддерживает предопределенные семантические аннотации.

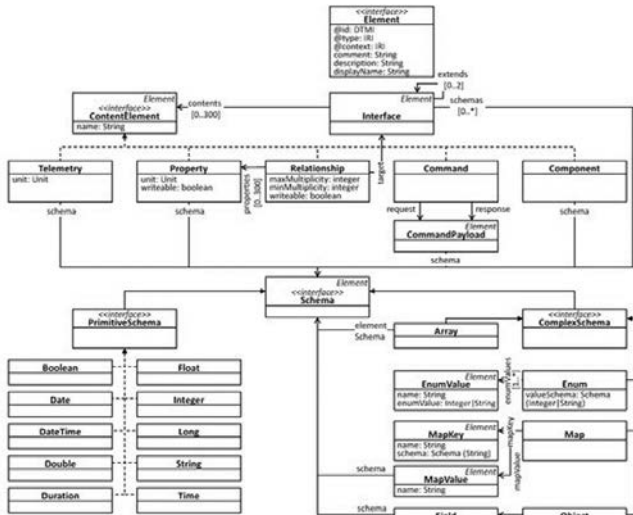


Рисунок 8. Диаграмма классов, изображающая метамодель языка определения цифровых двойников.

VII. Цеховой цифровой двойник в интеллектуальном производстве

В рассматриваемой ранее работе [6] в контексте системного обзора цифровых двойников предложена оригинальная типовая цифровая модель производственного участка или цеха.

Шестимерный цифровой двойник (рис. 9) состоит из двух сред: физической и цифровой. Физическое пространство в основном представлено физическим уровнем, который содержит в себе все потенциально существующие физические объекты. Цифровое пространство - виртуальный аналог физического,

созданный для отражения его поведения. Сетевой уровень обеспечивает двустороннюю связь вышеописанных пространств, а их синхронизация обеспечивается технологиями IoT и CPS.

Далее представлены краткие описания каждого слоя цифрового двойника:

1. Физический слой представлен физическими объектами, разнородные данные с которых собираются в режиме реального времени и передаются далее с помощью сетевого уровня.
2. Сетевой уровень является посредником между двумя пространствами - физическим и виртуальным. Он создаёт двунаправленное соединение между ними.
3. Уровень интеграции данных служит для приема и хранения данных, а также отвечает за их предварительную обработку, агрегацию и интеграцию.
4. Слой модели разделён на пять подмоделей, отличающихся атрибутами и методами. Данный уровень нужен для структуризации виртуального аналога цеха, для чего применяются механизмы абстракции и инкапсуляции.
5. Слой знаний создан для управления проблемами производственной системы путём объединения динамических знаний с возможностью самостоятельного принятия решений.
6. Прикладной уровень включает в себя набор методов и приложений для поддержки функциональных возможностей цифрового двойника.

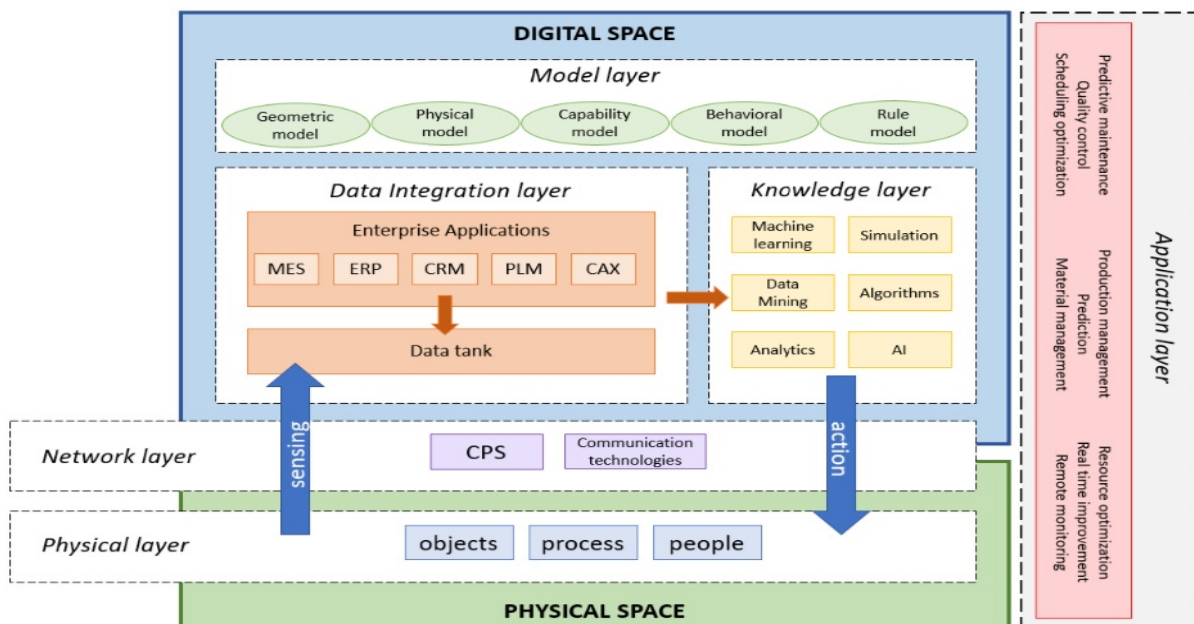


Рисунок 9. Шестимерный цифровой двойник цеха.

VIII. НАЦИОНАЛЬНЫЕ СТАНДАРТЫ

Выше обсуждался вопрос об актуальности

использования стандартов в индустрии цифровых двойников для достижения максимально возможной функциональной совместимости двойников в экосистеме Индустрии 4.0. В связи с чем кратко анализируем состояние национальной

стандартизации в этой сфере.

Рассмотрим следующие Предварительные национальные стандарты (ПНСТ):

- ПНСТ 429-2020. Умное производство. ДВОЙНИКИ ЦИФРОВЫЕ ПРОИЗВОДСТВА. Часть 1. Общие положения.
- ПНСТ 430-2020. Умное производство. ДВОЙНИКИ ЦИФРОВЫЕ ПРОИЗВОДСТВА. Часть 2. Типовая архитектура.
- ПНСТ 431-2020. Умное производство. ДВОЙНИКИ ЦИФРОВЫЕ ПРОИЗВОДСТВА. Часть 3. Цифровое представление физических производственных элементов.
- ПНСТ 432-2020. Умное производство. ДВОЙНИКИ ЦИФРОВЫЕ ПРОИЗВОДСТВА. Часть 4. Обмен информацией.

В стандарте - ПНСТ 429-2020 определены основные понятия, связанные с цифровизацией производства, представлены общие положения и основополагающие принципы цифровых двойников производства, а также руководящие указания по созданию структуры цифровых двойников производства. Предложенная концепция двойника производства иллюстрируется на рис. 10.



Рисунок 10. Концепция цифровых двойников производства [ПНСТ 429-2020].

Цифровой двойник производства основан на цифровой модели, осуществляющей детальное моделирование конфигураций физических сущностей и динамическое моделирование изменений продукции, процесса и ресурсов в процессе производства. Представление цифрового двойника предполагает наличие взаимодействия с физическими производственными элементами посредством обмена эксплуатационными данными и данными об условиях окружающей среды в режиме реального времени, благодаря чему цифровой двойник может использоваться для мониторинга объектов производства, предиктивного обслуживания,

интеллектуализации и оптимизации управления производством, в том числе в реальном времени и т. д. На рисунке 11 показана верхнеуровневая модель цифрового двойника производства на основе доменов, т.е. предметных областей, определяющих множества различных задач, которые должны выполняться на отдельных производственных участках с учетом логического и физического разделения. Здесь домены используются для разделения функций по зонам ответственности. Домены структуры цифрового двойника производства подразделяют на четыре категории в соответствии с задачами и функциями, находящимися в зоне ответственности каждого домена. А именно, доменами структуры цифрового двойника производства являются:

- домен сбора данных и управления устройствами (DCDCD);
- домен представления цифрового двойника (DTRD), состоящий из субдомена эксплуатации и управления (OMSD), субдомена приложений и сервисов (ASSD) и субдомена доступа к ресурсам и обмена данными (RAISD);
- домен пользователя (UD).

Цифровое представление и физический мир связаны и синхронизированы между собой через среду сбора данных и управления устройствами.

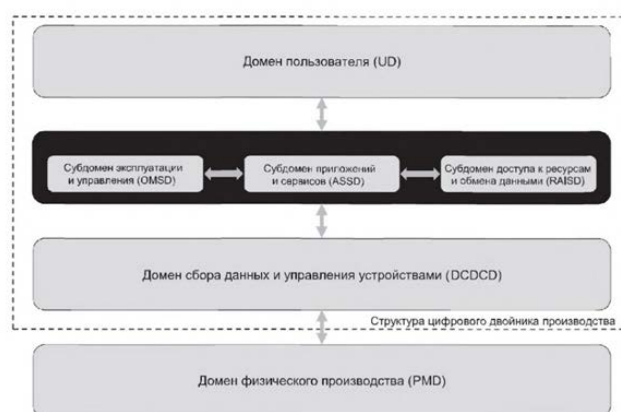


Рисунок 11. Концепция структуры цифрового двойника производства [ПНСТ 429-2020].

Цифровые двойники производства представляют собой сложные системы, которые разрабатываются и реализуются на основе иерархического подхода, охватывающего различные уровни абстракции, например уровень станков, производственного участка, цехов, предприятия и т. д.

В стандарте - ПНСТ 430-2020 приводится описание типовой архитектуры структуры цифровых двойников производства, включающей два архитектурных представления – функциональное и сетевое. Рассмотрим первое из них.

На Рис. 12 представлено функциональное представление архитектуры цифрового двойника.

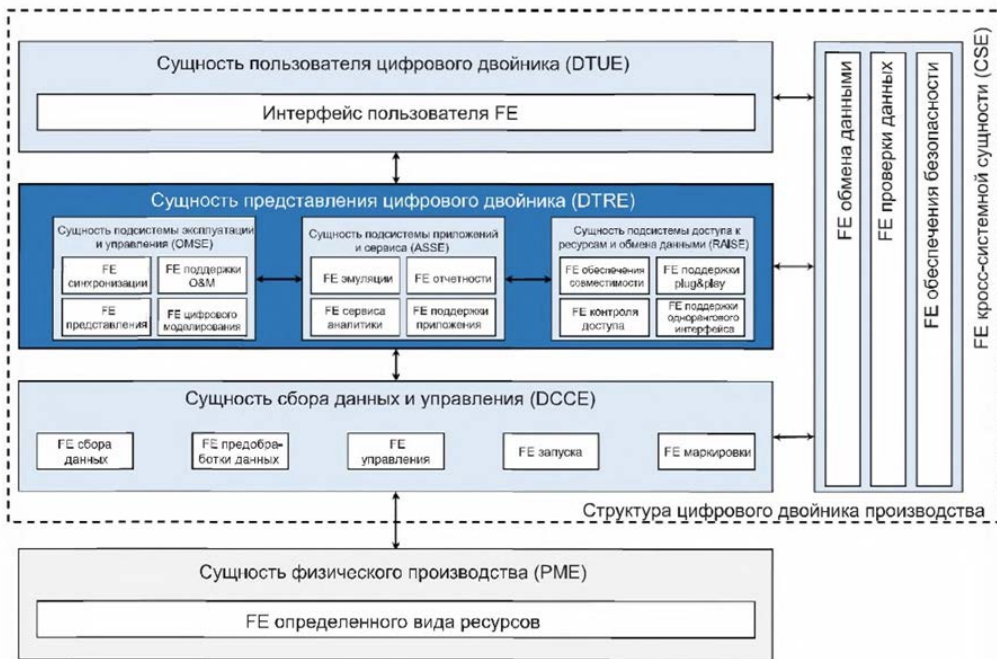


Рисунок 12. Функциональное представление архитектуры цифрового двойника на основе сущностей [ПНСТ 430-2020].

На Рис. 12 указаны следующие функциональные сущности (FE):

- 1) для уровня PME: сущность FE является ресурсом физического производства.
- 2) для уровня DCCE: FE сбора данных от PME, FE предобработки собранных данных (например, фильтрацию и объединение), FE - функционал управления PME по запросу DTRE, FE запуска PME в действие по запросу DTRE аналогично FE управления, FE маркировки, осуществляющий идентификацию PME и его данных,

3) для уровня DTRE:

- функциональные сущности подсистемы эксплуатации и управления: FE синхронизации (обеспечивает функционал синхронизации статуса цифровой сущности со статусом наблюдаемого производственного элемента), FE представления наблюдаемого производственного элемента в виде цифровой сущности, FE цифрового моделирования и интерпретации данных о наблюдаемом производственном элементе, FE поддержки O&M,
- функциональные сущности подсистемы ASSE: FE эмуляции поведения физических сущностей, FE сервиса аналитики для анализа данных, полученных от PME и результата эмуляции, FE отчетности о результатах производства, анализа эмуляции и пр., FE поддержки приложений хостинговой платформы для реализации предиктивных и реактивных, открытых и закрытых приложений (например, Node.js).

- функциональные сущности подсистемы RAISE: FE обеспечения совместимости с другими DTRE, FE контроля доступа пользователя к PME, FE поддержки plug&play, т.е. динамического использования PME, FE однорангового интерфейса, обеспечивающего (вместе с FE обеспечения совместимости) функционал взаимодействия с другими DTRE.
- 4) для уровня DTUE: FE пользовательского интерфейса, обеспечивающего совместимость DTUE с DTRE.
- 5) Функциональные сущности кросс-системной сущности (CSE): FE обмена данными между субъектами структуры цифрового двойника производства по соответствующим сетевым протоколам, FE проверки данных (вместе с FE обеспечения безопасности обеспечивают точность и целостность данных, FE обеспечения безопасности структуры цифрового двойника производства, включая аутентификацию, авторизацию, конфиденциальность, целостность и т. д.

В стандарте - ПНСТ 431-2020 рассмотрены требования к определению производственных элементов, которые должны быть представлены в цифровых двойниках производства. Производственные элементы представляют собой информацию о производственных ресурсах (активах), таких как персонал, оборудование, материалы, процессы, инфраструктура и продукты. Сущность физического производства (PME) включает в себя производственные элементы, которые должны отслеживаться и данные о состоянии которых должны считываться, а также те, которые могут приводиться в действие и управляться сущностью сбора данных и управления (DCCE). Сущность представления цифрового двойника (DTRE) включает в себя цифровую модель производственных элементов.

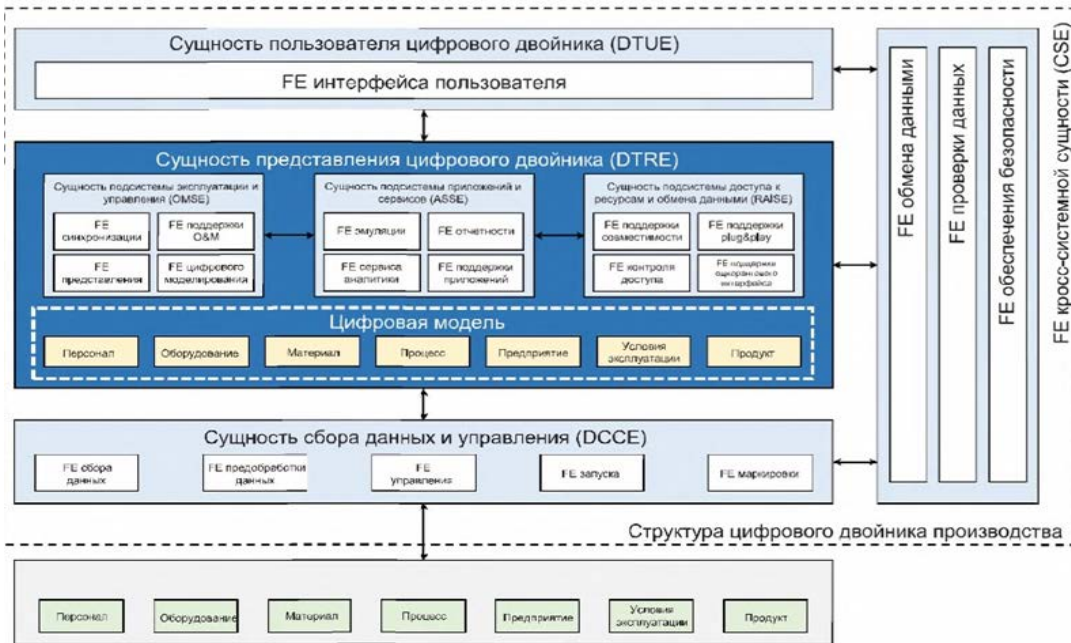


Рисунок 13. Производственные элементы в типовой архитектуре цифрового двойника производства [ПНСТ 431-2020].

Для цифрового представления производственного элемента он должен быть смоделирован на основании данных, связанных с производственными элементами. Данные могут быть статическими и динамическими. Начальная конфигурация производственного элемента статична, однако непрерывные изменения в производственных процессах динамичны. Эти данные

анализируют и используют для цифрового представления производственных элементов с помощью DTRE.

В стандарте - ПНСТ 432-2020 рассмотрены вопросы организации обмена данными в цифровом двойнике. С помощью расширения функционального представления типовой архитектуры цифровых двойников производства, определенного в ПНСТ 430, вводится четыре типа обмена данными в цифровом двойнике. Такое расширение функционального представления типовой архитектуры показано на Рис. 14.

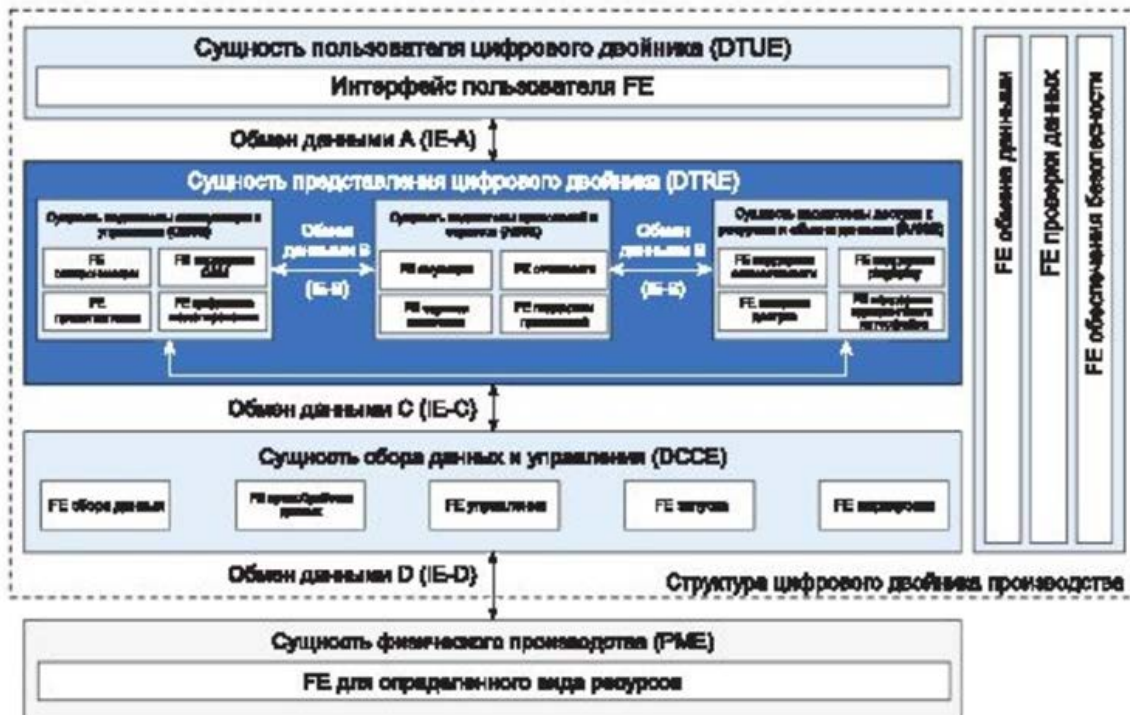


Рисунок 14. Функциональное представление типовой архитектуры цифровых двойников производства, расширенное потоками данных в цифровом двойнике

Введены следующие типы обменов:

- обмен данными А (IE-A), который представляет собой интерфейс взаимодействия между сущностью пользователя цифрового двойника (DTUE) и сущностью представления цифрового двойника (DTRE),
- обмен данными В (IE-B), который представляет собой интерфейсы взаимодействия между тремя сущностями подсистем DTRE,
- обмен данными С (IE-C), который представляет собой интерфейс взаимодействия между DTRE и сущностью сбора данных и управления (DCCE),
- обмен данными D (EI-D), который представляет собой интерфейс взаимодействия между DCCE и сущностью физического производства (PME).

Далее в стандарте рассматриваются требования и стандартизованные методы обмена данными для введенных типов обмена.

IX. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведен обзор архитектурных решений, применяемых при создании и использовании таких сложных объектов какими являются цифровые двойники физических активов, примерами которых служат: технические системы, производственные процессы, компании, цеха, машины и т.п. Интерес к этой теме обусловлен тем, что парадигма цифровых двойников стала одним из ведущих драйверов Индустрии 4.0, а сложность цифровых двойников делает разработку архитектуры двойников одной из ключевых задач процесса их создания. Учитывая, что двойники могут включать в свой состав многочисленные приложения и сервисы, а также поддерживать возможности своего функционального расширения, важным аспектом при выборе архитектурных решений становится свойство открытости двойников, т.е. соответствие стандартам. Поэтому в статье значительное внимание уделялось стандартам, определяющим архитектуры цифровых двойников. Надо отметить, что полная система стандартов в этой области находится еще в стадии формирования. Акцент в работе делался на двух классах архитектурных моделей двойников, являющихся, по мнению авторов, опорными при их создании. Первый класс относится к архитектурным моделям уровня метамodelей в терминологии OMG, предназначенных для определения метаданных, описывающих двойники. Этот уровень можно назвать онтологическим. Анализ рассмотренных выше подходов для определения моделей описания метаданных, в частности, метамodelей AssetAdministrationShell, WoT TD, DTDL и др, показывает, что они обладают примерно одинаковыми описательными возможностями.

Выбор этих стандартов в каждом конкретном случае в качестве руководящих принципов может зависеть от требований к полноте сопутствующих стандартов (поиска описания двойников, методов доступа к их

свойствам, представления различных видов данных, связанных с двойниками и пр.) или от предпочтений разработчиков.

Для достижения реальной интероперабельности двойников, созданных на основе этих стандартов, как следует из работы [24, 25], исследуются и разрабатываются стандарты, использующие базовые онтологии для решения семантических проблем и обеспечения совместности стандартов путем установления семантических связей между существующими стандартами, что может позволить в будущем привести к созданию глобальной системы стандартов для индустрии 4.0. с использованием онтологий для установления семантической совместности. Онтологический подход откроет большие возможности для создания двойников системы систем, включая национальный цифровой двойник [26]. Второй класс моделей относится к описанию системных архитектур двойников, рассматриваемых как сложные программно-аппаратные комплексы. Что касается класса стандартов моделей, определяющих системную архитектуру двойников производственных активов, то национальные стандарты нового поколения ПНСТ 429-2020 - ПНСТ 431-2020, являясь согласованными с архитектурными моделями Интернета вещей и Промышленного интернета вещей, по мнению авторов статьи, могут успешно применяться в качестве методической основы при разработке широкого класса двойников производственных систем.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Kahlen, F.-J., Flumerfelt, S., & Alves, A. (2017). Transdisciplinary perspectives on complex systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*.
- [2] Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85–113). Springer.
- [3] Lim, K. Y. H., Zheng, P., & Chen, C.-H. (2019). A state-of-the-art survey of digital twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives [Journal Article]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-25.
- [4] Cheng, Y., Zhang, Y., Ji, P., Xu, W., Zhou, Z., & Tao, F. (2018). Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(1-4), 1209–1221. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2001-2>,
- [5] Lim, K.Y.H., Zheng, P. & Chen, C. A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. *J Intell Manuf* 31, 1313–1337 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01512-w>.
- [6] Angelo Corallo, Vito Del Vecchio, Marianna Lezzi and Paola Morciano. Shop Floor Digital Twin in Smart Manufacturing: A Systematic Literature Review. *Sustainability* 2021, 13, 12987. <https://doi.org/10.3390/su132312987> - <https://www.mdpi.com/journal/sustainability>.
- [7] Michael Jacoby and Thomas Usländer, Digital Twin and Internet of Things—Current Standards Landscape, *Appl. Sci.* 2020, 10(18), 6519; <https://doi.org/10.3390/app10186519>, <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/18/6519/htm>.
- [8] Meta Object Facility (MOF) Specification, Version 1.4; Object Management Group (Ed.) Object Management Group: Milford, MA, USA, 2002.
- [9] Digital Twin and Asset Administration Shell Concepts and Application in the Industrial Internet and Industrie 4.0 An Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0 Joint Whitepaper - Available: <https://www.iiconsortium.org/pdf/Digital-Twin-and-Asset-Administration-Shell-Concepts-and-Application-Joint-Whitepaper.pdf>.

- [10] RAMI 4.0 - A Reference Framework for Digitalisation. Plattform Industrie 4.0, Ed. Available online: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.pdf> (accessed on 9 August 2020).
- [11] Details of the Asset Administration Shell: Part 1-The Exchanges of Information between Partners in the Value Chain of Industrie 4.0 (Version 2.0.1). Plattform Industrie 4.0, Ed. 2020. Available online: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details-of-the-Asset-Administration-Shell-Part1.pdf> (accessed on 9 August 2020).
- [12] Hoffmeister, M. Properties and the Asset Administration Shell as Information Backbone-How Can True Interoperability be Achieved along the Entire Industrie 4.0 Value Chain. Available online: https://www.eclass.eu/fileadmin/pdfs/1_16-55_Hoffmeister.pdf (accessed on 9 August 2020).
- [13] Web of Things Thing Description. Available online: <https://www.w3.org/TR/wot-thing-description/> (accessed on 9 August 2020).
- [14] Web of Things Working Group Charter. Available online: <https://www.w3.org/2020/01/wot-wg-charter.html> (accessed on 9 August 2020).
- [15] Vinicius da Silva Souza, Robson Cruz, Walmir Acioli e Silva, Vicente Lucena Jr. A Digital Twin Architecture Based on the Industrial Internet of Things Technologies. Conference: 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)/ 10.1109/ICCE.2019.8662081, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8662081>.
- [16] H. Haskamp, F. Orth, J. Wermann and A. W. Colombo, "Implementing an OPC UA interface for legacy PLC-based automation systems using the Azure cloud: An ICPS-architecture with a retrofitted RFID system," 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), St. Petersburg, 2018, pp. 115-121.
- [17] OPC Foundation "OPC UA Part 1 – Overview and Concepts 1.03 Specification," 2015.
- [18] Y. Liu, Y. Peng, B. Wang, S. Yao, and Z. Liu, "Review on cyber-physical systems," in IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, vol. 4, no. 1, pp. 27-40, Jan. 2017.
- [19] Lu, Q., Parlikad, A., Woodall, P., Don Ranasinghe, G., & Heaton, J. (2019). Developing a dynamic digital twin at a building level using cambridge campus as a case study [Journal Article].
- [20] Erkoyuncu, J. A., Butala, P., & Roy, R. (2018). Digital twins: Understanding the added value of integrated models for through-life engineering services [Journal Article]. *Procedia Manufacturing*, 16, 139-146.
- [21] Shen, W., Hao, Q., & Xue, Y. (2012). A loosely coupled system integration approach for decision support in facility management and maintenance [Journal Article]. *Automation in Construction*, 25, 41-48.
- [22] Luo, W., Hu, T., Ye, Y., Zhang, C., & Wei, Y. (2020). A hybrid predictive maintenance approach for cnc machine tool driven by digital twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 65.
- [23] Burns, T.; Cosgrove, J.; Doyle, F. A Review of Interoperability Standards for Industry 4.0. *Procedia Manuf.* 2019, 38, 646–653. [Google Scholar] [CrossRef]
- [24] Thomas Burns*, Dr John Cosgrove, A Review of Interoperability Standards for Industry 4.0. 29th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2019), June 24-28, 2019, Limerick, Ireland. Frank Doyle Limerick Institute of Technology, Moylish, Limerick, V94 EC5T, Ireland.
- [25] Models for Internet of Things Environments—A Survey Ana Cristina Franco da Silva and Pascal Hirmer *Information* 2020, 11(10), 487; Available: <https://doi.org/10.3390/info11100487> <https://www.mdpi.com/2078-2489/11/10/487/htm>
- [26] В.П. Куприяновский, Д.Е. Намиот, А.А. Климов, А.П. Добрынин, А.В. Корзун, М.Г. Жабицкий, Н.Ю. Выходов, А.А. Лысогорский. Онтологии кибер-физических систем национального цифрового двойника Великобритании и ВІМ на примерах умных городов, железных дорог и других проектов. *International Journal of Open Information Technologies* ISSN: 2307-8162 vol. 9, no.3, 2021.

Analysis of approaches to the architectural design of digital twins

D. A. Gapanovich, V. A. Tarasova, V. A. Sukhomlin, V. P. Kupriyanovsky

Abstract – The modern approach to the creation and operation of complex objects (physical assets, such as, technical systems, production processes, companies, workshops, machines, etc.) involves the use of their full-scale digital models, called Digital Twins (DT). With the help of such twins, all essential information about assets is collected, their state and dynamic characteristics are displayed in real time, and also, thanks to the mirror information connection between the twin and assets, it is possible to manipulate assets through their digital representations. Thus, DTs become an effective decision support tool for asset management. One of the key tasks of the process of developing such complex digital models as DT is the task of choosing a DT system architecture. Considering that twins can include numerous applications and services, tools for cooperation with the environment, as well as support the possibilities of their functional expansion, an important aspect when choosing architectural solutions is the property of openness DT, i.e. compliance with standards. The article provides an analysis of architectural solutions proposed to create digital twins of complex technical and production systems, with the main focus on standards.

Key words - digital twin, asset administration shell, hybrid digital twin, interoperability, Industry 4.0, industrial manufacturing, internet of things, interoperability, standardization, metamodels, basic ontologies

REFERENCES

- [1] Kahlen, F.-J., Flumerfelt, S., & Alves, A. (2017). Transdisciplinary perspectives on complex systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*.
- [2] Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85–113). Springer.
- [3] Lim, K. Y. H., Zheng, P., & Chen, C.-H. (2019). A state-of-the-art survey of digital twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives [Journal Article]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-25.
- [4] Cheng, Y., Zhang, Y., Ji, P., Xu, W., Zhou, Z., & Tao, F. (2018). Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(1–4), 1209–1221. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2001-2>,
- [5] Lim, K.Y.H., Zheng, P. & Chen, C. A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. *J Intell Manuf* 31, 1313–1337 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01512-w>.
- [6] Angelo Corallo, Vito Del Vecchio, Marianna Lezzi and Paola Morciano. Shop Floor Digital Twin in Smart Manufacturing: A Systematic Literature Review. *Sustainability* 2021, 13, 12987. <https://doi.org/10.3390/su132312987> - <https://www.mdpi.com/journal/sustainability>.
- [7] Michael Jacoby and Thomas Usländer, Digital Twin and Internet of Things—Current Standards Landscape, *Appl. Sci.* 2020, 10(18), 6519; <https://doi.org/10.3390/app10186519>, <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/18/6519/htm>.
- [8] Meta Object Facility (MOF) Specification, Version 1.4; Object Management Group (Ed.) Object Management Group: Milford, MA, USA, 2002.
- [9] Digital Twin and Asset Administration Shell Concepts and Application in the Industrial Internet and Industrie 4.0 An Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0 Joint Whitepaper - Available: <https://www.iiconsortium.org/pdf/Digital-Twin-and-Asset-Administration-Shell-Concepts-and-Application-Joint-Whitepaper.pdf>.
- [10] RAMI 4.0 - A Reference Framework for Digitalisation. Plattform Industrie 4.0, Ed. Available online: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.pdf> (accessed on 9 August 2020).
- [11] Details of the Asset Administration Shell: Part 1-The Exchanges of Information between Partners in the Value Chain of Industrie 4.0 (Version 2.0.1). Plattform Industrie 4.0, Ed. 2020. Available online: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details-of-the-Asset-Administration-Shell-Part1.pdf> (accessed on 9 August 2020).
- [12] Hoffmeister, M. Properties and the Asset Administration Shell as Information Backbone-How Can True Interoperability be Achieved along the Entire Industrie 4.0 Value Chain. Available online: https://www.eclass.eu/fileadmin/pdfs/l_16-55_Hoffmeister.pdf (accessed on 9 August 2020).
- [13] Web of Things Thing Description. Available online: <https://www.w3.org/TR/wot-thing-description/> (accessed on 9 August 2020).
- [14] Web of Things Working Group Charter. Available online: <https://www.w3.org/2020/01/wot-wg-charter.html> (accessed on 9 August 2020).
- [15] Vinicius da Silva Souza, Robson Cruz, Walmir Acioli e Silva, Vicente Lucena Jr. A Digital Twin Architecture Based on the Industrial Internet of Things Technologies. Conference: 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)/ 10.1109/ICCE.2019.8662081, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8662081>.
- [16] H. Haskamp, F. Orth, J. Wermann and A. W. Colombo, "Implementing an OPC UA interface for legacy PLC-based automation systems using the Azure cloud: An ICPS-architecture with a retrofitted RFID system," 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), St. Petersburg, 2018, pp. 115-121.
- [17] OPC Foundation "OPC UA Part 1 – Overview and Concepts 1.03 Specification," 2015.
- [18] Y. Liu, Y. Peng, B. Wang, S. Yao, and Z. Liu, "Review on cyber-physical systems," in *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 4, no. 1, pp. 27-40, Jan. 2017.
- [19] Lu, Q., Parlikad, A., Woodall, P., Don Ranasinghe, G., & Heaton, J. (2019). Developing a dynamic digital twin at a building level using cambridge campus as a case study [Journal Article].
- [20] Erkoynucu, J. A., Butala, P., & Roy, R. (2018). Digital twins: Understanding the added value of integrated models for through-life engineering services [Journal Article]. *Procedia Manufacturing*, 16, 139-146.
- [21] Shen, W., Hao, Q., & Xue, Y. (2012). A loosely coupled system integration approach for decision support in facility management and maintenance [Journal Article]. *Automation in Construction*, 25, 41-48.
- [22] Luo, W., Hu, T., Ye, Y., Zhang, C., & Wei, Y. (2020). A hybrid predictive maintenance approach for cnc machine tool driven by digital twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 65.
- [23] Burns, T.; Cosgrove, J.; Doyle, F. A Review of Interoperability Standards for Industry 4.0. *Procedia Manuf.* 2019, 38, 646–653. [Google Scholar] [CrossRef]
- [24] Thomas Burns*, Dr John Cosgrove, A Review of Interoperability Standards for Industry 4.0. 29th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2019), June 24-28, 2019, Limerick, Ireland. Frank Doyle Limerick Institute of Technology, Moylish, Limerick, V94 EC5T, Ireland.
- [25] Models for Internet of Things Environments—A Survey Ana Cristina Franco da Silva and Pascal Hirmer *Information* 2020, 11(10), 487; Available: <https://doi.org/10.3390/info11100487> <https://www.mdpi.com/2078-2489/11/10/487/htm>

- [26] V.P. Kupriyanovsky, D.E. Namiot, A.A. Klimov, A.P. Dobrynin, A.V. Korzun, M.G. Zhabitsky, N.Y. Vykhodov, A.A. Lysogorsky. Ontologies of cyberphysical systems of the UK's national digital twin and BIM on examples of smart cities, railways and other projects. International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 9, no.3, 2021.