

УДК 004.738:006.354

**ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ УМНОГО ПРОИЗВОДСТВА:
ПОНЯТИЙНЫЙ АППАРАТ И КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ**

Андрианова Людмила Прокопьевна

д-р техн. наук, профессор

Голубев Дэнис Михайлович

Уфимский государственный
нефтяной технический университет

Аннотация: В статье приведены результаты анализа основных положений предварительного национального стандарта Российской Федерации в области цифровых двойников умного производства: понятийный аппарат, структура цифровой модели, сбор данных и управления, наблюдаемые производственные сущности, приложения и сервисы цифровых двойников производства, преимущества использования цифрового двойника производства, элементы цифровых двойников производства, требования к цифровым двойникам производства. Результаты анализа систематизированы и представлены в табличном и графическом виде.

Ключевые слова: Умное производство, цифровой двойник производства, понятийный аппарат, структура цифрового двойника производства, элементы цифровых двойников, цифровые сущности, требования к цифровым двойникам производства.

**DIGITAL COUNTERPARTS OF SMART MANUFACTURING:
CONCEPTUAL FRAMEWORK AND CONSTRUCTION CONCEPT**

Andrianova Lyudmila Prokopyevna

Golubev Denis Mikhailovich

Abstract: The article presents the results of the analysis of the main provisions of the preliminary national standard of the Russian Federation in the field of digital twins of smart production : the conceptual apparatus, the structure of the digital model, data collection and management, the observed production entities,

applications and services of digital twins of production, the advantages of using a digital twin of production, elements of digital twins of production, requirements for digital twins of production. The results of the analysis are systematized and presented in tabular and graphical form.

Key words: Smart production, digital production twin, conceptual apparatus, structure of digital production twin, elements of digital doubles, digital entities, requirements for digital production doubles.

«Умное производство (англ. Smart Manufacturing) – это максимально интенсивное и всеобъемлющее использование сетевых информационных технологий и киберфизических систем на всех этапах производства продукции и её поставки». Умное производство предполагает использование следующих технологий [1, с. 16]:

1) Умные машины, способные обмениваться информацией с другими производственными системами и работать с высокой степенью автономности, и продвинутые роботы;

2) Индустриальный интернет вещей. Устройства и технологии, обеспечивающие интернет-соединение для всех машин на производстве;

3) Облачные сервисы, предоставляющие удобный и непрерывный сетевой доступ к общему пулу настраиваемых вычислительных ресурсов;

4) Интеграционные платформы предприятия, задача которых - принимать данные от оборудования, анализировать и агрегировать их;

5) Технологии Big Data.

В серии стандартов ПНСТ «Умное производство. Двойники цифровые производства» определена структура цифровых двойников производства как виртуального представления физических элементов производственного процесса, таких как персонал, продукты производства, активы и описание процессов [2, с. 3]. Понятийный аппарат в области умного производства и цифровых двойников с пояснениями представлен в таблицах 1 и 2 [2].

Таблица 1

Общие термины, связанные с умным производством

Термин	Определение
Исполнительное устройство (actuator):	Устройство, предназначенное для запуска физического действия при получении входного сигнала.

ИННОВАЦИОННЫЙ ДИСКУРС РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ

Производственный участок (area):	Физическая, территориальная или логическая группа объектов, определяемая в рамках производственной площадки. [ГОСТ Р МЭК 62264-1—2014, пункт 3.1.2]
Контроль (control):	Целенаправленное действие в процессе или над ним для достижения определенных целей.
Элемент (element):	Базовая часть системы, имеющая характеристики состояния, поведения и идентификации. [ГОСТ Р ИСО 14258—2008, пункт 2.2.4]
Предприятие (enterprise):	Одна или несколько организаций, имеющих определенное назначение, общие цели и задачи по выпуску конкретной продукции или предоставлению определенных услуг. [ГОСТ Р МЭК 62264-1—2014, пункт 3.1.10]
Сущность (entity):	Обособленно существующий предмет (материальный или нематериальный).
Интернет вещей (Internet of Things), IoT:	Инфраструктура взаимосвязанных сущностей, систем и информационных ресурсов, а также служб, позволяющих обрабатывать информацию о физическом и виртуальном мире и реагировать на нее.
Управление (management):	Направление деятельности, контроль и координация работ, выполняемых для производства продукции или предоставления услуг
Физический элемент (physical element):	Элемент, имеющий материальное существование в реальном мире.
Ресурс (resource):	Любое устройство, инструмент и средства, за исключением сырья и компонентов конечной продукции, имеющихся в распоряжении предприятия для производства товаров и услуг. [ГОСТ Р ИСО 15531-1—2008, пункт 3.6.43]
Датчик (sensor):	Средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающийся непосредственному восприятию наблюдателем (по РМГ 29). [ГОСТ Р 51086—97, статья 1]
Задача (task):	Деятельность, необходимая для достижения цели. [ГОСТ Р ИСО 9241-11—2010, пункт 3.9]
Верификация (verification):	Подтверждение посредством представления объективных свидетельств того, что установленные требования были выполнены. [ГОСТ Р ИСО 9000—2015, статья 3.8.12]
Валидация (validation):	Подтверждение посредством представления объективных свидетельств того, что требования, предназначенные для конкретного использования или применения, выполнены. [ГОСТ Р ИСО 9000—2015, статья 3.8.13]

Таблица 2

Термины, связанные с цифровыми двойниками производства

Термин	Определение
Цифровая сущность (digital entity):	Любой вычислительный элемент или элемент данных. <i>Цифровая сущность может существовать как облачная служба в центре обработки данных, а также как сетевой элемент или как шлюз.</i>
Цифровая модель (digital model):	Информационная дискретная модель, сформированная для обработки на компьютере.
Цифровой двойник (digital twin):	Программно-аппаратный комплекс, реализующий комплексную динамическую модель для исследования и управления деятельностью социотехнической системы.
Производственный процесс (manufacturing process):	Структурированный комплекс видов деятельности или работ, выполняемых с материалом для перевода его из сырья или заготовки в завершенное в дальнейшем состояние. <i>Производственные процессы могут быть организованы по схеме процесса, продукта на основе участия различных подразделений или по установленной схеме.</i> <i>Производственные процессы могут планироваться для поддержания уровня запасов, выполнения заказов, сборки в соответствии с заказом и т. д. на основе стратегического применения и размещения запасов.</i> [ГОСТ Р ИСО 15531-1—2008, пункт 3.6.25]
Представление цифрового двойника (digital twin representation):	Отображение цифрового двойника в человеко-читаемом или машиночитаемом формате.
Визуализация (visualization):	Процесс использования отображений информации об изделии и информации о представлении для создания отображения. [ГОСТ 33707—2016, статья 4.146] <i>Примером визуализации является изображение на дисплее станка с ЧПУ, фрезерующего алюминиевый корпус. ЧПУ — числовое программное управление (Computer Numerical Control, CNC).</i>
Точка зрения (view/viewpoint):	Проекция модели, рассматриваемая с определенной целью и в которой отсутствуют сущности, не относящиеся к выбранной цели.

Цифровой двойник производства представляет собой цифровую модель (рис. 1), которая постоянно обновляется и изменяется по мере изменения физического аналога с целью синхронного представления данных о статусе, условиях работы, конфигурации продукта и состоянии ресурсов.

Представление цифрового двойника позволяет цифровому двойнику постоянно взаимодействовать с физическими производственными элементами

путем обмена эксплуатационными данными и данными об условиях окружающей среды.



Рис. 1. Концепция цифровых двойников производства [2, с. 4]

С помощью представления цифрового двойника можно обнаружить аномалии в производственных процессах и достичь различных функциональных целей, таких как управление в режиме реального времени, получение аналитики в автономном режиме, проверка работоспособности, предиктивное обслуживание, синхронизированный мониторинг/оповещения, оптимизация управления производственным процессом (MOM), адаптация во время процесса, анализ больших данных и т. д. (таблица 3).

Таблица 3

Приложения и сервисы цифровых двойников производства

Управление в режиме реального времени	Приложение, работающее в режиме реального времени, использует текущее состояние цифровых двойников производства для внесения изменений в производственный процесс в режиме реального времени.
Аналитика в автономном режиме	Приложение предиктивного обслуживания, работающее в режиме реального времени или автономном режиме, использует цифровые двойники производства для

ИННОВАЦИОННЫЙ ДИСКУРС РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ

	планирования и адаптации мероприятий по обслуживанию производственного оборудования.
Проверка работоспособности	Приложение для проверки работоспособности использует цифровые двойники производства для проверки физических элементов и производственных процессов и при необходимости планирует предиктивное обслуживание.

Использование цифрового двойника производства увеличивает показатели эффективности в цикле планирования и валидации, в соблюдении графика производства, улучшении понимания производственных элементов, динамическом управлении рисками, снижении затрат и т. д. (таблица 4).

Таблица 4

Преимущества цифровых двойников производства

Планирование и валидация в цикле	Цифровой двойник производства позволяет проводить планирование, валидацию и адаптацию производственных процессов в цикле с использованием эмуляции.
Соблюдение плана производства	Цифровой двойник производства позволяет контролировать производство в режиме реального времени с целью динамического управления объемом производства и соответствия производственному плану.
Улучшенное понимание производственных элементов	Информация о наблюдаемых производственных элементах, содержащихся в цифровом двойнике производства, позволяет планировать производство и производственные планы.
Динамическое управление рисками	Приложения цифровых двойников производства, такие как управление в режиме реального времени, аналитика в автономном режиме, предиктивное обслуживание, проверка работоспособности и т. д., позволяют улучшить прогнозирование и управление текущими и будущими рисками.
Снижение затрат	Цифровые двойники производства уменьшают затраты на производство и управление.

Цифровые сущности с пояснениями приведены в таблице 5.

Таблица 5

Цифровые сущности

Приложение цифрового двойника производства	Приложение цифрового двойника производства использует представление цифрового двойника для предоставления данных о текущем состоянии производственного оборудования и операций или внесения в них изменений.
Описание продукта	Описанием продукта является спецификация свойств продукта, необходимых для того, чтобы его охарактеризовать, например таких, как размеры, допуски, отделка поверхности и т. д.
Описание процесса	Описанием процесса является спецификация компетенций персонала, оборудования, физических активов, материальных ресурсов и операций, необходимых для выполнения производственного процесса.

Элементы цифровых двойников производства обозначены в таблице 6.

Таблица 6

Элементы цифровых двойников производства

Наблюдаемые производственные элементы	Наблюдаемый производственный элемент имеет видимое физическое присутствие или функционал в производственных процессах.
Персонал	Персонал в производстве, как правило, включает тех сотрудников, которые прямо или косвенно вовлечены в производственные процессы.
Оборудование	Оборудование — это физический элемент, выполняющий функционал, который прямо или косвенно участвует в производственных процессах. Примерами оборудования являются ручной инструмент, станок с ЧПУ конвейерная лента, роботы и т. д.
Материал	Материалом является физическая материя, которая становится целым продуктом или его частью, например металлический корпус, или используется для облегчения производственных процессов, т. е. чистящая жидкость, охлаждающая жидкость и т. д.
Процесс	Процессы включают производственные процессы, процессы обслуживания, процессы управления и т. д.

ИННОВАЦИОННЫЙ ДИСКУРС РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ

Инфраструктура	Инфраструктура связана с производством или оказывает определенное влияние на производственные процессы. Примерами инфраструктуры являются помещения специального назначения, здания, энергоснабжение, водоснабжение, устройства управления условиями эксплуатации и т. д.
Условия эксплуатации	Условия эксплуатации — это те необходимые условия, которые должны быть обеспечены предприятиями для выполнения производственного процесса. Примерами условий эксплуатации являются температура, влажность, освещенность и т. д.
Продукт	Продуктом является определенный результат или побочный продукт производственного процесса. В зависимости от стадии производственного процесса с точки зрения бизнеса продукт может быть классифицирован как промежуточный продукт или как конечный продукт.

Структура цифрового двойника производства содержит рекомендации о том, каким образом построить систему цифрового двойника производства и как приложения и источники данных могут взаимодействовать для целей цифрового двойника производства, но не определяет конкретных технологий их реализации.

Верхнеуровневая концепция цифрового двойника производства показана на рис. 2. Цифровой двойник, изображенный как представление цифрового двойника, и физический мир, представленный как физическое производство, связаны и синхронизированы между собой через среду сбора данных и управления устройствами. Синхронизация между цифровыми сущностями и физическими производственными элементами как в режиме реального времени, так и в автономном режиме обеспечивает постоянную оптимизацию производственных систем, так как цифровые двойники получают данные о производительности физической системы в режиме реального времени.

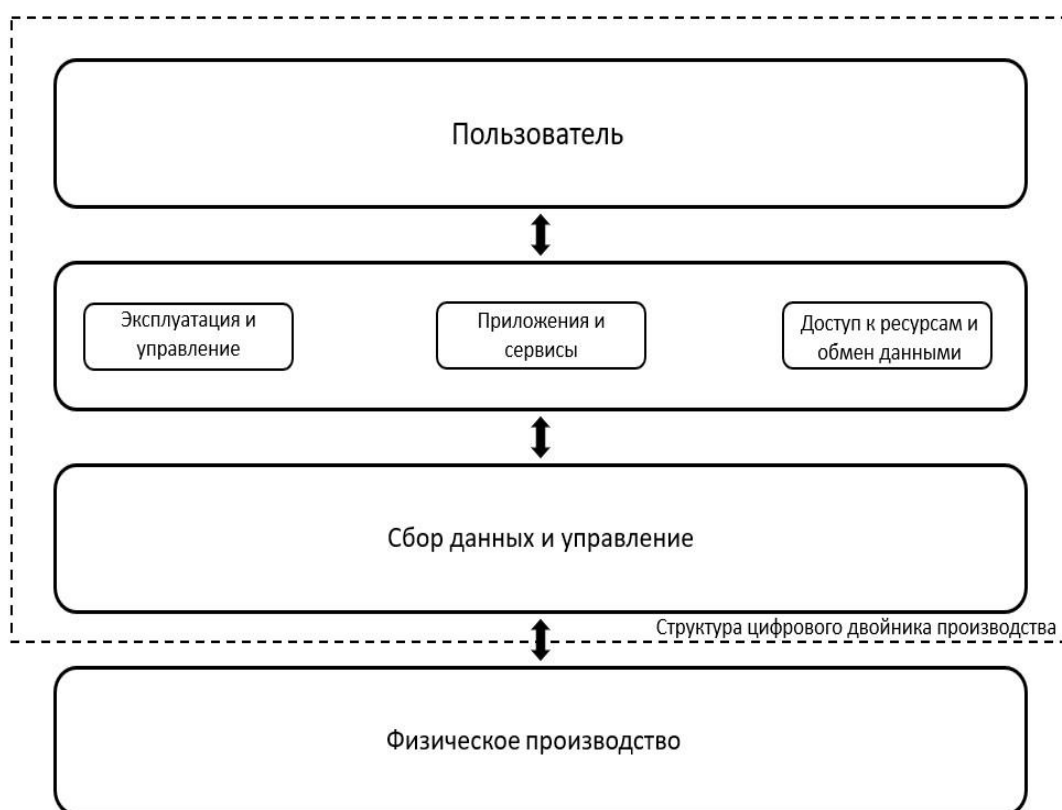


Рис. 2. Концепция структуры цифрового двойника производства [2, с. 6]

Система цифровых двойников производства может быть реализована на различных уровнях абстракции, т. е. на уровне станков, производственного участка, сущности, предприятия и т. д.

Структура цифровых двойников производства может быть применена ко всем уровням функциональной и ролевой иерархии, определенной в ГОСТ Р МЭК 62264-1.

Общие требования к цифровым двойникам производства приведены в таблице 7.

Таблица 7

Общие требования к цифровым двойникам производства

Сбор данных	Система цифровых двойников производства должна осуществлять сбор данных с датчиков, установленных на производственном оборудовании или около него. Примечание — Датчики для идентификации и/или обнаружения присутствия персонала могут быть установлены в специальных устройствах контроля доступа.
Взаимодействие	Между элементами цифровых двойников производства должен происходить обмен данными или информацией.

ИННОВАЦИОННЫЙ ДИСКУРС РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ

Представление	Информация должна быть представлена в визуальном и/или машиночитаемом формате, который может быть распознан человеком или компьютером. Примерами такого формата являются аудио, видео, изображение, текст, битовый поток данных и т. д.
Анализ данных	Данные, полученные в процессе производства, следует анализировать для извлечения информации о состоянии наблюдаемых производственных элементов. При анализе метрологических данных должны учитывать показатели точности, допустимого интервала контроля показателя и специфические особенности метрологической модели цифрового двойника.
Управление	Структура цифровых двойников производства должна обеспечивать управление соответствующими элементами цифровых двойников в рамках производственной задачи.
Синхронизация	В реализации цифровых двойников производства виртуальные элементы и связанные с ними данные должны быть своевременно связаны с соответствующим физическим или функциональным элементом и данными.
Хранилище данных	Хранилище данных предназначено для постоянного или временного хранения данных с целью моделирования, обмена, анализа или архивирования данных и т. д.
Эмуляция	Представление цифровых двойников производства должно включать в себя моделирование поведения производственной системы в процессе эксплуатации.
Схема	Представление цифровых двойников производства должно поддерживать различные схемы в соответствии с конкретными целями.

Требования к моделированию цифровых двойников производства в отношении точности, интероперабельности, совместимости и масштабируемости с пояснениями приведены в таблице 8.

Требования к обмену информацией между субъектами системы цифровых двойников производства в отношении синхронизации, точности и целостности информации приведены в таблице 9.

Таблица 8

Требования к моделированию цифровых двойников производства

Точность	Цифровой двойник производства должен описывать соответствующие аспекты своего физического аналога с учетом метрологических показателей и метрологической модели цифрового двойника.
Интероперабельность	Должна быть обеспечена интероперабельность цифрового двойника производства для его интеграции, добавления новых элементов или модернизации.
Совместимость	Цифровой двойник производства должен быть совместим с другими типами цифровых моделей в рамках данной системы цифровых двойников производства. Совместимость цифровых моделей долж на

ИННОВАЦИОННЫЙ ДИСКУРС РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ

	быть обеспечена с учетом особенностей метрологических моделей цифровых двойников производства.
Масштабируемость	Цифровой двойник производства должен обеспечивать возможность просмотра в различных масштабах для разных задач.

Таблица 9

Требования к обмену информацией

Регулярное сетевое взаимодействие	Обмен информацией между субъектами системы цифровых двойников производства должен быть осуществлен в течение заданного времени с заданной частотой с использованием надлежащих сетевых протоколов.
Синхронизация	Статус цифровых сущностей в представлении цифровых двойников производства должен быть синхронизирован со статусом наблюдаемых производственных элементов или, наоборот, путем регулярного сетевого взаимодействия.
Точность информации	Информация, передаваемая между субъектами системы цифровых двойников производства, должна быть точной. Точность информации обеспечивается применением метрологических показателей в математической модели цифрового двойника.
Целостность	Информация не должна изменяться в процессе обмена, за исключением случаев преднамеренного изменения субъектами, имеющими право на внесение изменений.

Выводы.

1. Цифровой двойник производства представляет собой детальное моделирование конфигураций физических сущностей и динамическое моделирование изменений продукции, процесса и ресурсов в процессе производства.

2. Цифровой двойник производства основан на цифровой модели, которая может обновляться и изменяться по мере изменения физического аналога с целью синхронного представления состояния, условий работы, конфигурации продукта и состояния ресурсов.

3. Представление цифрового двойника производства позволяет цифровому двойнику постоянно взаимодействовать с визуальными производственными элементами путем обмена эксплуатационными данными и данными об условиях эксплуатации.

4. С помощью представления цифрового двойника производства можно обнаружить аномалии в производственных процессах и достичь различных функциональных целей, таких как управление в режиме реального

времени, аналитика в автономном режиме, проверка работоспособности, предиктивное обслуживание, синхронизированный мониторинг/оповещения, оптимизация управления производственным процессом (МОМ), адаптация процесса, анализ больших данных, машинное обучение и т.д.

5. Цифровой двойник производства зависит от назначения и может быть частичным представлением физической системы. Он может состоять исключительно из тех соответствующих данных и моделей, которые специально разработаны для их целевого назначения.

Список литературы

1. «Умные» среды, «умные» системы, «умные» производства: серия докладов (зеленых книг) в рамках проекта «Промышленный и технологический форсайт Российской Федерации» / Коллектив авторов; Фонд «Центр стратегических разработок «Северо-Запад». – СПб., 2012. – Вып. 4. – 62 с.

2. ПНСТ 429. Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2020. – 12 с. (Срок действия — с 2021—01—01 до 2024—01—01)

3. ПНСТ 430. Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 2. Типовая архитектура. – М.: Стандартинформ, 2020. – 16 с. (Срок действия — с 2021—01—01 до 2024—01—01)

4. ПНСТ 431. Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 3. Цифровое представление физических производственных элементов. – М.: Стандартинформ, 2020. – 16 с. (Срок действия — с 2021—01—01 до 2024—01—01)

5. ПНСТ 432. Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 4. Обмен информацией. – М.: Стандартинформ, 2020. – 32 с. (Срок действия — с 2021—01—01 до 2024—01—01)

© Л.П. Андрианова, Д.М. Голубев, 2021