

Научная статья  
УДК 004.942

## Методика создания цифровых двойников вооружения, военной и специальной техники и их обликосые характеристики

Дмитрий Вячеславович Самойлов, Сергей Владимирович Хохлов

*Аннотация.* В статье предлагается методика разработки цифровых двойников вооружения, военной и специальной техники в привязке к жизненному циклу реального изделия. Рассмотрены две фазы существования цифрового двойника: автономная и проходящая во взаимодействии с образцом. Предложена классификация обликосых характеристик цифровых двойников различного назначения. Приведены примеры обликосых характеристик цифровых двойников для некоторых типовых задач, таких как сопровождение разработки, виртуальные испытания, тренажер и система оценки и прогноза технического состояния.

*Ключевые слова:* цифровой двойник; компьютерное моделирование; обработка данных; жизненный цикл изделия; вооружение, военная и специальная техника

*Для цитирования:* Самойлов Д.В., Хохлов С.В. Методика создания цифровых двойников вооружения, военной и специальной техники и их обликосые характеристики // Вооружение и экономика. 2024. №2(68). С. 76-81.

Original article

## Methodology for Digital Twins Development of Weapons, Military and Special Equipment and Their Conceptual Performances

Dmitrii V. Samoilov, Sergei V. Khokhlov

*Abstract.* The article proposes a methodology for developing digital twins of weapons, military and special equipment in connection with the life cycle of a real product. Two phases of the existence of a digital twin are considered: autonomous and passing through interaction with the sample. A classification of the appearance characteristics of digital twins for various purposes is proposed. Examples of the appearance of digital twins are given for some typical tasks, such as development support, virtual testing, a simulator, and a system for assessing and predicting technical condition.

*Keywords:* digital twin; computer modeling; data processing; product life cycle; weapons, military and special equipment

*For citation:* Samoilov D.V., Khokhlov S.V. Methodology for Digital Twins Development of Weapons, Military and Special Equipment and Their Conceptual Performances // Armament and Economics. 2024. No.2(68). P. 76-81.

Цифровой двойник (Digital Twin) представляет собой один из основных трендов 4-й промышленной революции (Industry 4.0) наряду с технологией больших данных (Big Data), промышленным Интернетом вещей (Industrial Internet of Things), а также технологиями дополненной и виртуальной реальности (AR/VR).

Внедрение цифровых двойников в жизненный цикл изделий является основополагающей концепцией цифровизации производства.

Цифровой двойник – виртуальная интерактивная копия реального изделия, моделирующая его внутренние процессы, технические характеристики и функционирование в заданных условиях применения. Цифровой двойник представляет собой совокупность моделей и данных, уточняемых и дополняемых на всех стадиях жизненного цикла изделия, в том числе собираемых с помощью датчиков, установленных на реальном образце и объединенных промышленным Интернетом вещей [1; 2]. Для обработки информации, получаемой в ходе эксплуатации, как правило, используется технология больших данных, а для визуального отображения процесса моделирования – технология виртуальной реальности.

Основные задачи, решаемые с помощью цифрового двойника вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), в привязке к стадиям жизненного цикла изделий ВВСТ, определяемым соответствующим стандартом, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Задачи, решаемые с помощью цифрового двойника

Стадия жизненного цикла изделия ВВСТ	Задача, решаемая с помощью цифрового двойника
Исследование и обоснование разработки	Обликовые исследования
Разработка	Оценка и выбор технических решений
	Виртуальные испытания
Производство	Разработка и корректировка технологической документации
Эксплуатация	Выработка способов применения
	Предиктивное техническое обслуживание
	Определение модернизационного потенциала

Цифровой двойник повышает обоснованность принимаемых решений и обеспечивает существенную экономию материальных и временных затрат.

Цифровой двойник также может использоваться в качестве учебной информационной модели в составе учебно-тренировочных средств.

Согласно ГОСТ Р 57700.37-2021<sup>1</sup> цифровой двойник разрабатывается и применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия, изменяясь на каждой стадии. Это обуславливает специфику его программно-аппаратной реализации, состоящую в необходимости ее итерационной настройки и доработки для достижения и сохранения соответствия цифрового двойника реальному изделию с учетом изменений, вносимых в него на протяжении всего жизненного цикла.

Вследствие этого большинство распространенных методологий разработки, завершающихся созданием образца, удовлетворяющего изначально поставленным требованиям, таких, например, как подход, регламентированный серией стандартов «Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника», а также другие варианты каскадной модели нецелесообразно применять для цифрового двойника. Также оказываются малоприменимы циклические модели разработки (спиральная, скрам-проект и т.п.), поскольку далеко не всегда следующая итерация доработки цифрового двойника может быть заранее запланирована. Кроме того, не исключается вероятность того, что может потребоваться не просто корректировка текущей программной реализации, а практически полное изменение архитектурно-алгоритмических решений с последующей разработкой реализующего их нового программного обеспечения.

Для разработки цифровых двойников ВВСТ предлагается методика, которая включает традиционные этапы разработки, создания и испытаний, и при этом предусматривает несколько вложенных циклов доработки, выполняемых при определенных условиях (рисунок 1).

Жизненный цикл цифрового двойника условно разделен на две фазы: автономную и проходящую во взаимодействии с реальным образцом. Процесс создания и доработки цифрового двойника начинается с определения требований к его обликовым характеристикам, на основании которых выполняется его проектирование, включающее разработку архитектурных и алгоритмических решений. Затем создается их программная реализация и производится ее верификация. На основании данных от реального образца выполняется валидация разработанного цифрового двойника. После этого может быть начато его использование по назначению. В ходе использования выполняется оценка соответствия двойника поставленным функциональным задачам. По результатам этой оценки может быть продолжено его использование или инициирована процедура доработки. По результатам соответствующего анализа принимается решение либо о настройке программного обеспечения, либо о необходимости его доработки. Последующий анализ позволяет установить глубину необходимых доработок вплоть до пересмотра заложенных архитектурных и алгоритмических решений.

<sup>1</sup> ГОСТ Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: РСТ, 2021. 16 с.

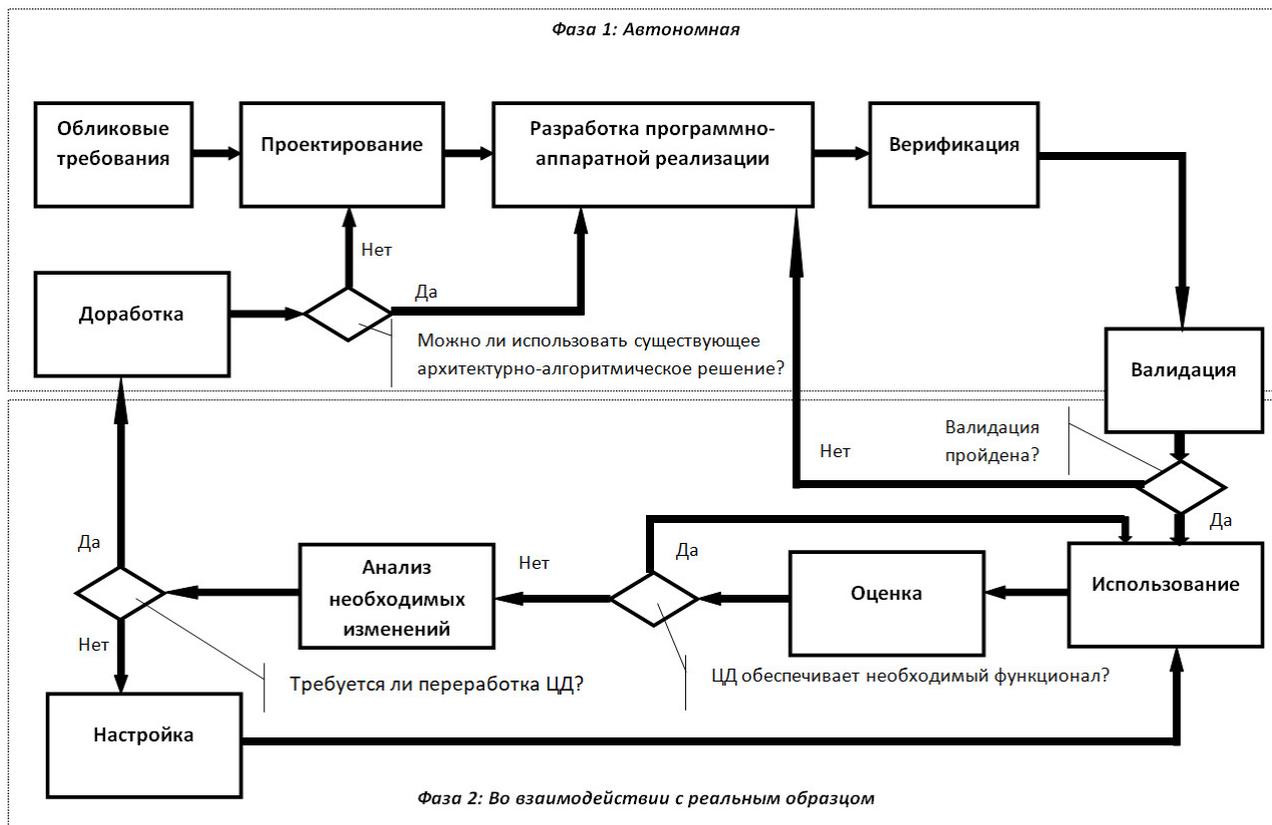


Рисунок 1 – Методика формирования цифрового двойника

Формирование совокупности обликовых характеристик цифрового двойника является ключевым этапом его разработки. В ряде зарубежных публикаций [3-5] предложено несколько вариантов классификации данных характеристик, однако все они являются узкоспециализированными и не охватывают всех аспектов функционирования цифровых двойников.

Согласно предлагаемой методологии ключевыми обликовыми характеристиками цифрового двойника являются: работа с данными; передача данных; тип данных; архитектура; степень соответствия; модель деятельности оператора; очередность создания; синхронизация.

**Работа с данными** – эта характеристика определяет целевую направленность совокупности операций с данными, выполняемых цифровым двойником. Тремя вариантами являются:

1. **Обработка данных** – данная группа задач включает в себя анализ, оценку и прогнозирование процесса функционирования реального образца.
2. **Преобразование данных** – сбор, преобразование и передача данных от реального образца в хранилище архивных данных.
3. **Хранение данных** – цифровой двойник является предметно-ориентированной информационной базой данных (репозиторием) с возможностью коллективного доступа.

При разработке конкретного цифрового двойника может быть реализован один из перечисленных вариантов работы с данными либо любая их комбинация.

**Передача данных** – данная характеристика определяет один из двух возможных вариантов взаимодействия реального образца и цифрового двойника:

1. **Односторонняя передача**, при которой в ходе жизненного цикла цифровой двойник получает данные от реального образца и корректируется с целью достижения требуемого уровня соответствия ему. Изменения в цифровом двойнике могут быть вызваны только изменениями в реальном образце. В ряде публикаций данный вариант цифрового двойника называют цифровой тенью [3; 4; 6].

2. Двусторонняя передача предусматривает, что изменения, вносимые на цифровом двойнике, должны отражаться в изменениях реального образца и наоборот. Такой вариант связи позволяет обосновывать изменения в конструкторских и алгоритмических решениях реального образца посредством моделирования их альтернативных вариантов с помощью цифрового двойника.

*Тип данных* – данная характеристика определяет то, какие данные поступают от реального образца к цифровому двойнику. Двумя базовыми категориями являются:

1. Необработанные данные – данные, получаемые непосредственно от датчиков, размещенных на реальном образце, а также от измерительной аппаратуры, применяемой на стендах и в ходе испытаний.

2. Обработанные данные – данные, которые подверглись некоторой обработке, очистке или преобразованию, чтобы сделать их более подходящими для анализа. Это может включать удаление ошибок, преобразование данных в более удобный формат и т.п. Источником обработанных данных, как правило, являются базы данных.

Цифровые двойники могут использовать как один, так и оба типа данных.

*Архитектура* – данная характеристика определяет порядок обработки информации, методы ее преобразования в данные, а также принципы взаимодействия технических средств и программного обеспечения. Двумя базовыми разновидностями являются:

1. Открытая архитектура предусматривает реализацию комплекса решений по аппаратной и программной совместимости, обеспечивающих возможность использования цифрового двойника с другими системами (например, с комплексами полунатурного моделирования), возможность использования нескольких разнотипных цифровых двойников для одного реального образца и т.п.

2. Закрытая архитектура – данное решение предполагает, что цифровой двойник полностью замкнут на реальный образец и подключение дополнительных систем, других двойников и т.п. не предусмотрено.

*Степень соответствия* – данная характеристика определяет полноту отображения всех свойств и процессов реального образца в цифровом двойнике. Принципиально возможны две категории:

1. Полное соответствие предполагает, что в цифровом двойнике воспроизводятся все характеристики и процессы, даже если это не требуется для решения текущих задач, поставленных перед цифровым двойником.

2. Частичное соответствие предполагает отображение в цифровом двойнике только тех характеристик и процессов реального объекта, которые необходимы для решения конкретной задачи.

*Модель деятельности оператора* – эта характеристика определяет то, как в цифровом двойнике моделируется деятельность оператора, управляющего реальным объектом. Двумя базовыми вариантами являются:

1. Физическое моделирование, при котором реальная деятельность оператора с возможно более полным воспроизведением ее психологической структуры замещается ее модификацией с помощью специальных устройств, имитаторов, стендов и т.п. Человек управляет цифровым двойником, так как он управлял бы реальным образцом при решении задач по назначению. Данный подход позволяет проводить исследования в интересах оценки влияния различных решений в области человеко-машинных интерфейсов, уровня подготовки и психофизиологического состояния оператора и т.п.

2. Математическое моделирование, при котором в состав цифрового двойника включается модель оператора, создаваемая на основе структурно-алгоритмической формализации его деятельности и эргономическом анализе функционирования системы «человек-машина-среда» с учетом психофизических особенностей восприятия. Подобный подход позволяет проводить моделирование в режиме «быстрее реального времени», а также обеспечивает возможность параллельного обсчета нескольких реализаций.

*Очередность создания* – данная характеристика определяет порядок создания реального объекта и его цифрового двойника. Возможны три варианта:

1. Цифровой двойник создается параллельно с реальным образцом.
2. Цифровой двойник создается после создания реального образца.
3. Создание цифрового двойника опережает создание реального образца. В ряде публикаций данный вариант цифрового двойника называют цифровым прототипом [3-6].

*Синхронизация* – эта характеристика определяет то, когда происходит сверка цифрового двойника с реальным объектом и приведение его в соответствие с ним. Базовыми вариантами являются:

1. Этапная синхронизация выполняется на каждом этапе ОКР по созданию реального образца (эскизный и технический проекты, заводские, предварительные и государственные испытания).

2. Периодическая синхронизация осуществляется с заданной периодичностью, которая в общем случае может меняться в зависимости от этапа разработки или жизненного цикла реального образца.

3. Событийная синхронизация производится в случае внесения изменений в реальный образец или выявления несоответствия цифрового двойника реальному образцу.

4. Непрерывная синхронизация может рассматриваться как периодическая, осуществляемая с максимально возможной с точки зрения технической реализации частотой. Данный тип синхронизации используется при решении узкого спектра специализированных задач, например, в системе прогноза технического состояния объекта на основе его цифрового двойника.

Перечисленные виды синхронизации не являются взаимоисключающими и могут применяться в различных сочетаниях на различных этапах жизненного цикла изделия.

Совокупность обликовых характеристик цифрового двойника формируется исходя из его целевого предназначения. Некоторые примеры обликов цифровых двойников для типовых задач приведены в таблице 2. Цифры в ячейках таблицы соответствуют приведенным выше порядковым номерам вариантов обликовых характеристик цифровых двойников. Так, например, при использовании цифрового двойника в качестве учебной информационной модели в составе тренажера типом работы с данными является их обработка (1), передача данных может быть односторонней (от реального образца к двойнику) (1), при этом используются обработанные данные (2), архитектура системы будет открытой (1), соответствие реальному образцу частичным (будут отображаться только те характеристики, которые важны с точки зрения обучения применению) (2), оператор будет управлять двойником как реальным образцом ВВСТ (1), цифровой двойник может быть создан после изготовления реального образца (2), синхронизация цифрового двойника с реальным образцом будет производиться в случае внесения изменений в реальный образец (3).

Таблица 2 – Примеры обликов цифровых двойников

Характеристика	Целевое предназначение цифрового двойника			
	Сопровождение разработки	Виртуальные испытания	Тренажер	Система оценки и прогноза технического состояния
Работа с данными	1,3	1,2	1	1,2
Передача данных	2	1	1	2
Тип данных	1,2	1	2	1
Архитектура	1	2	1	2
Степень соответствия	1	2	2	1
Модель деятельности оператора	1,2	1,2	1	1
Очередность создания	1,3	1,2	2	2
Синхронизация	1,2,3	1,3	3	4

После того как сформирован облик цифрового двойника, разрабатывается архитектура программной реализации, включающая систему моделей, интерфейсные модули для информационного обмена с реальным образцом и базы данных для хранения параметров работы моделей и результатов моделирования. На этом же этапе разрабатывается архитектура системы виртуального окружения (цифрового полигона), предназначенная для оценки функционирования цифрового двойника в заданных условиях. В общем случае виртуальная среда должна моделировать пространство действия (рельеф, водную среду и т.п.) вместе с метеоусловиями, объекты воздействия, взаимодействующие и противодействующие системы и комплексы. Помимо этого необходимо сформировать расчетные задачи, представляющие собой формализацию типичных задач по назначению, решаемых изделием ВВСТ, для которого разрабатывается цифровой двойник.

После того как разработана архитектура программной реализации цифрового двойника и системы виртуального окружения, а также сформирован перечень расчетных задач, переходят к разработке соответствующих моделей.

В зарубежной практике в основном опираются на специализированные средства разработки цифровых двойников, такие как Anylogic Digital Twin, Siemens NX, Autodesk Digital Twin, Ansys Twin Builder, Microsoft: Azure Digital Twins и т.п., а также пакеты программ для решения задач технических вычислений типа MATLAB/Simulink [7] и Openmodelica [8]. Вместе с тем, в текущих условиях исходя из необходимости обеспечения технологического суверенитета использование подобных пакетов и зарубежных облачных сервисов в отечественной практике нецелесообразно. Российские средства разработки, такие как CML-Bench, могут быть успешно применены в ряде областей, однако ни одно из них (равно как и зарубежные) не предоставляет полного охвата с точки зрения моделирования всех аспектов функционирования изделий. Наиболее гибким, хоть и наиболее затратным подходом является разработка моделей цифрового двойника и системы виртуального окружения с помощью универсальных языков программирования типа С (C++).

#### Список источников

1. Pal S.K., Mishra D., Pal A., Dutta S., Chakravarty D., Pal S. Digital Twin – Fundamental Concepts to Applications in Advanced Manufacturing. Springer Nature, 2022. 495 p.
2. Ganguli R., Adhikari S., Chakraborty S., Ganguli M. Digital Twin: A Dynamic System and Computing Perspective. CRC Press, 2023. 240 p.
3. Vohra M. Digital Twin Technology Fundamentals and Applications. Scrivener Publishing & Wiley, 2022. 272 p.
4. Crespi N., Drobot A.T., Minerva R. The Digital Twin. Springer Nature, 2023. 1250 p.
5. Nath S.V., Schalkwyk P., Isaacs D. Building Industrial Digital Twins: Design, develop, and deploy digital twin solutions for real-world industries using Azure Digital Twins. Packt Publishing, 2021. 286 p.
6. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: АльянсПринт, 2020. 401 с.
7. Khaled N., Pattel B., Siddiqui A. Digital Twin Development and Deployment on the Cloud. Academic Press, 2020. 592 p.
8. Fritzson P. The Openmodelica Environment for Building Digital Twins of Sustainable Cyber-Physical Systems // Proceedings of the 2021 IEEE Winter Simulation Conference (Phoenix, AZ, USA, December 12-15, 2021). DOI: 10.1109/WSC52266.2021.9715443.

#### Информация об авторах

Д.В. Самойлов – кандидат технических наук.