

Обзорная статья  
УДК 004.4'2  
DOI: [10.34759/trd-2023-131-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-24)

## **ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД**

**Кузнецова Светлана Валентиновна<sup>1✉</sup>, Семенов Александр Сергеевич<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Москва, Россия

<sup>1</sup>[k\\_svetlana\\_valen@mail.ru](mailto:k_svetlana_valen@mail.ru)<sup>✉</sup>

<sup>2</sup>[fractoidnets@gmail.com](mailto:fractoidnets@gmail.com)

*Аннотация.* В статье исследуется технология разработки цифровых двойников (ЦД) в аэрокосмической промышленности. В ней детально определены основные особенности, связанные с созданием ЦД, и рассмотрены фундаментальные технологии, необходимые для их реализации: интернет вещей (IoT), XR (расширенная реальность), облачные и квантовые вычисления, искусственный интеллект (AI) и кибербезопасность.

Предложена методология фрактальной аппроксимации для разработки, производства и эксплуатации ЦД на основе эластичных объектов, а также архитектура платформы для создания ЦД.

**Ключевые слова.** цифровой двойник изделия, жизненный цикл цифрового двойника, методология разработки цифровых двойников, IoT, XR (Extended reality), облачные вычисления, квантовое моделирование, декомпозиция системы, инкрементная объектно-ориентированная разработка, фрактальная аппроксимация

**Для цитирования:** Кузнецова С.В., Семенов А.С. Цифровые двойники в аэрокосмической промышленности: объектно-ориентированный подход // Труды МАИ. 2023. № 131. DOI: [10.34759/trd-2023-131-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-24)

Review article

## **DIGITAL TWINS IN THE AEROSPACE INDUSTRY: AN OBJECT-ORIENTED APPROACH**

**Svetlana V. Kuznetsova**<sup>1✉</sup>, **Alexander S. Semenov**<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

<sup>1</sup>[k\\_svetlana\\_valen@mail.ru](mailto:k_svetlana_valen@mail.ru)<sup>✉</sup>

<sup>2</sup>[fractoidnets@gmail.com](mailto:fractoidnets@gmail.com)

**Abstract.** The increasing complexity, versatility and uniqueness of aerospace products require new efficient approaches to their design and operation. It is expected that the use of digital twin technology will effectively solve emerging problems. In the publications and data sources, the concept of a digital twin is given quite a lot of definitions. The national standard GOST R 57700.37–2021, adopted in 2021, defines the digital twin of a product as follows: "A system consisting of a digital model of a product and two-way

information links with the product (if the product is available) and (or) its components." In the aerospace industry, there are the following features of creating digital twins:

1. A variety of simulated environments in which the product is operated: aerodynamic, vacuum, gravitational, plasma, radiation, thermodynamic, liquid, etc.
2. strict requirements for the adequacy and reliability of the product. At the same time, a digital twin of a complex product must be developed and manufactured within an acceptable timeframe, which requires new methods that adequately display the changing properties of physical objects in a digital representation.

The creation of a digital twin largely depends on the methodology of development, production and operation. It becomes relevant to create a software and technological platform for the production and use of digital twins in the aerospace industry, taking into account life cycle processes (according to GOST R 56135). A platform for creating digital twins should support the proposed methodology, methods for integrating physical objects with the Internet of Things, and graphodynamic description of simulated objects. The article explores the technology of developing digital twins in the aerospace industry. The main features of creating a digital twins in the aerospace industry have been determined. Fundamental technologies for the implementation of digital twins have been considered: Iot, XR, Cloud computing, AI, quantum modeling, cybersecurity. A fractal approximation methodology has been proposed for the development, production and operation of digital twins based on elastic objects, as well as a platform architecture for creating digital twins. The article considers incremental object-oriented development, production and operation of digital twins in combination with a graph-dynamic description of physical objects and methods of the Internet of things. Efficiency is achieved through the reuse of software and

hardware components, surrogate models that integrate physical objects with the Internet of things and graphodynamic description of simulated objects.

**Keywords:** product digital twin, digital twin lifecycle, digital twin development methodology, Iot, XR (Extended reality), cloud computing, quantum modeling, system decomposition, incremental object-oriented development, fractal approximation

**For citation:** Kuznetsova S.V., Semenov A.S. Digital twins in the aerospace industry: an object-oriented approach. *Trudy MAI*, 2023,

## **Введение**

Возрастающая сложность, многофункциональность и уникальность изделий аэрокосмической промышленности требует новых эффективных подходов к их проектированию и эксплуатации [10, 11].

Ожидается, что применение технологии цифровых двойников может эффективно решить появляющиеся проблемы [12-17].

Создание цифрового двойника во многом зависит от следующих факторов:

- методологии разработки, производства и эксплуатации;
- новых методов, адекватно отображающих свойства физических объектов в цифровое представление.

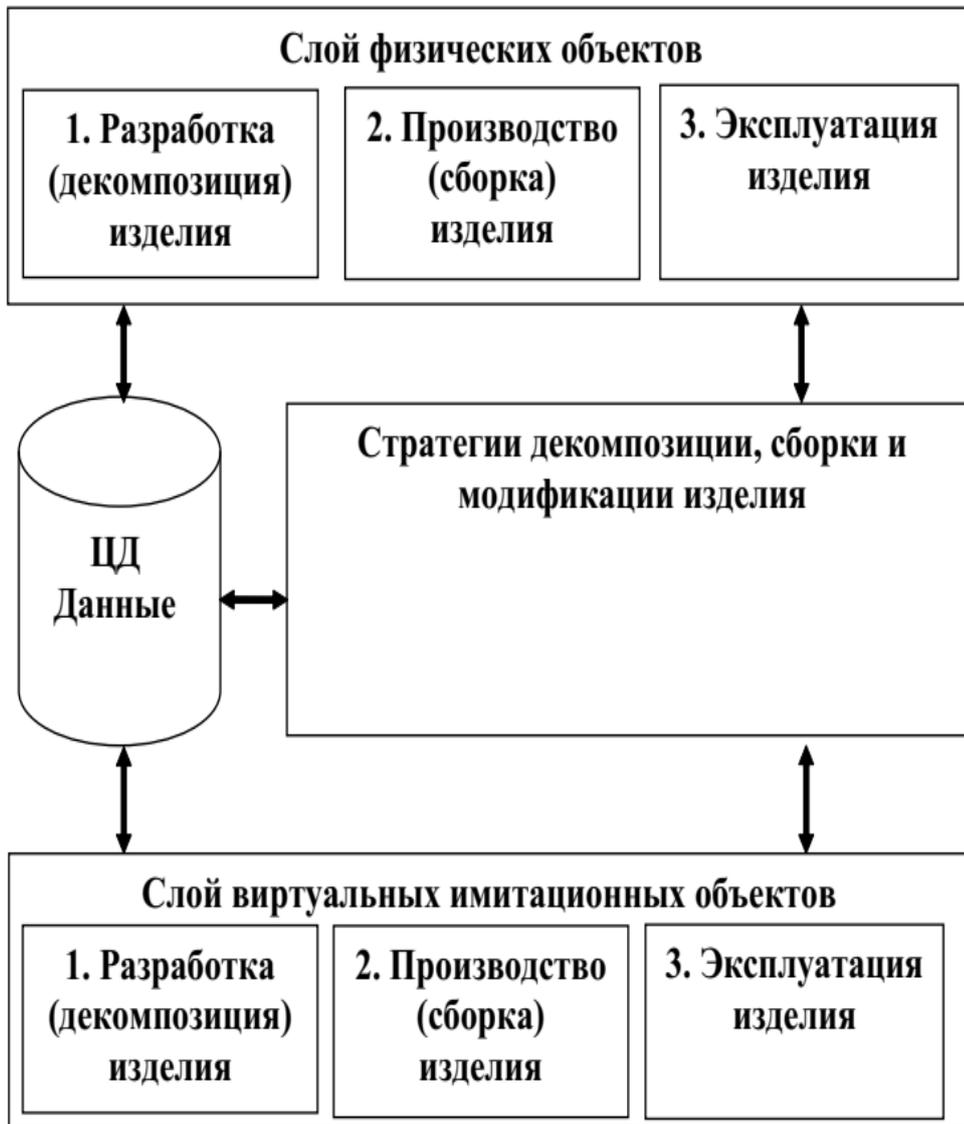
### **Технологические предпосылки создания цифровых двойников**

В литературе и информационных источниках дается достаточно много определений понятию Цифровой Двойник (ЦД, Digital Twins) [1-4]. Принятый в 2021 году национальный стандарт [ГОСТ Р 57700.37–2021](https://standarts.gost.gov.ru/standart/57700.37-2021) дает следующее определение:

"цифровой двойник изделия; ЦД: Система, состоящая из цифровой модели изделия и двухсторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями".

ЦД – это модель высокой точности, согласующаяся с физическим миром в виртуальном пространстве в виде оцифрованного представления.

Послойная архитектура ЦД - это структура, в которой ЦД организован на разных уровнях или слоях. Каждый слой выполняет определенные функции и предоставляет определенное представление или абстракцию ЦД.



Через непрерывное информационное взаимодействие замкнутой петли обратной связи и слияние данных с физическим миром моделируется поведение объектов физического мира.

Создание цифрового двойника требует определенных технологических предпосылок.



Предполагается использовать фундаментальные технологии [9, 20] для реализации ЦД: IoT, XR, Cloud вычисления, AI, квантовое моделирование, кибербезопасность.

Сенсоры IoT обеспечивают постоянную передачу данных, которые используются для создания цифровой копии физического объекта.

Благодаря своим возможностям визуализации XR (Extended reality) позволяет моделировать физические объекты в цифровом виде.

Облачные вычисления позволяют хранить полученные данные в виртуальном облаке и легко получать к ним доступ из любого места. В качестве расширенного аналитического инструмента искусственный интеллект автоматически анализирует полученные данные, предоставляет ценную информацию и делает прогнозы.

ЦД имеют следующие свойства:

1. Концентрация. Все данные в течение жизненного цикла физической системы хранятся в цифровом формате для централизованного и единого управления, обеспечивающего эффективную двустороннюю передачу данных.

2. **Целостность.** ЦД сложных систем интегрирует все подсистемы, являясь основой для высокой точности моделирования, в то время как мониторинг данных в реальном времени, позволяет модели содержать все знания о системе.
3. **Динамика.** Данные датчиков, описывающие физическую среду или состояние системы, могут быть использованы для динамического обновления моделей, обновленные модели могут динамически управлять фактической операцией, а взаимодействие в реальном времени между физическими системами и цифровыми моделями позволяет моделям расти и эволюционировать на протяжении всего их жизненного цикла.

### **Особенности создания ЦД в аэрокосмической промышленности**

Аэрокосмическая промышленность имеет глубокую историю создания прототипов ЦД [21-23], например, автоматизированные стенды для наработки на отказ различных подсистем авиационных и космических изделий, используемых на стадиях разработки, производства и эксплуатации, а также тренажеры.

Создание цифровых двойников в аэрокосмической промышленности имеет следующие особенности:

1. **Разнообразие моделируемых сред, в которых эксплуатируется изделие:** аэродинамической, вакуумной, гравитационной, плазменной, радиационной, термодинамической, жидкостной и т.д.
2. **Жесткие требования к адекватности моделирования, связанные с надежностью изделия.**

При этом ЦД изделия должен разрабатываться и производиться за приемлемый срок, что требует новых методов (прямых методов) адекватно отображающих изменяющиеся свойства физических объектов в цифровое представление.

Можно привести следующие примеры прямых методов:

1. Аэродинамическое моделирование со специализированной покраской элементов изделия с целью получения его аэродинамических характеристик без математических расчетов.
2. Рентгеновская съемка потока в сопле двигателя, при этом двигающиеся частицы потока могут быть окрашены.
3. Перспектива имитационного моделирования сред на основе квантовых вычислений. Описание явлений природы в масштабе атомов и субатомных частиц.

Полученные данные используются для создания ЦД посредством применения методов искусственного интеллекта, например, нейросетей с глубоким обучением, онтологий и т.д. Таким образом, последующие испытания и эксперименты могут проводиться с помощью цифрового двойника, снижая стоимость изделия.

Квантовые вычисления и цифровые двойники представляют две различные, но взаимосвязанные концепции, которые открывают новые возможности в области информационных технологий и оптимизации процессов.

Теория квантовой механики и квантовых вычислений основывается на уравнении Шрёдингера, которое описывает квантовую механическую систему:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = \hat{H} |\psi(t)\rangle$$

$i$  - мнимая единица, комплексного числа, то есть  $i^2 = -1$ ;

$\hbar$  - редуцированная постоянная Планка  $\hbar = h / 2\pi$ ;

$t$  – продолжительность (физическая величина для описания временного расстояния между событиями);

$|\psi(t)\rangle$  - состояние изолированной квантовой системы, представленной как элемент проективного пространства Гильберта;

$\hat{H}$  - Гамильтониан (квантовый оператор для энергии).

Позиционно-пространственная волновая функция  $\psi(x,t)$  записывается как внутреннее произведение зависящего от времени вектора состояний  $|\psi(t)\rangle$  с нефизическим, но удобным "положением собственных состояний"  $|x\rangle$ :

$$\psi(x, t) = \langle x | \psi(t) \rangle,$$

где  $|x\rangle$  обозначает позиционное собственное состояние, а  $\langle x|$  обозначает бра-вектор, соответствующий состоянию  $|x\rangle$ . В данном случае,  $\psi(x, t)$  представляет собой амплитуду вероятности нахождения частицы в определенном месте  $x$  в момент времени  $t$ .

Уравнение Шрёдингера определяет эволюцию состояния системы, представленную волновой функцией. Каждая волновая функция имеет амплитуду вероятности: комплексное число, определяющее вероятность получения определенного результата, при измерении системы.

В квантовых вычислениях, биты не описываются как в классических вычислениях находящиеся в определенном, фактическом состоянии 0, 1, а

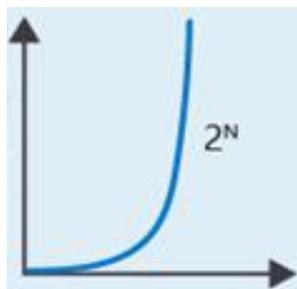
описываются вероятностью нахождения их в состоянии, когда мы их наблюдаем (измеряем).

Состояние кубит (от quantum bit, qbit) – это суперпозиция базисных состояний, описываемых линейной комбинацией:

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle ,$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  - амплитуды вероятности, которые являются комплексными числами.

В стандартном базисе  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ . Таким образом, квадрат модуля амплитуды представляет вероятность обнаружить кубит в соответствующем базисном состоянии при измерении. Количество возможных конфигураций кубитов в квантовом вычислении зависит от количества кубитов, которые участвуют в процессе.



Количество кубитов, N

N кубит, будет иметь  $2^N$  возможных конфигураций в суперпозиции.

Растет не только количество возможных конфигураций экспоненциально с числом кубитов  $2^N$ , число возможных комбинаций амплитуд становится бесконечным, пока квадратичное сложение их вероятностей равно 1.

Квантовые вычисления открывают перспективы для развития квантовых (цифровых) двойников и квантовых двойников. Квантовая концепция двойников не является противоречием в терминах, но вместо этого описывает гибридный подход, который может быть реализован с использованием современных технологий путем комбинирования классических концепций вычислений и цифровых двойников с квантовой обработкой.

Квантовые вычисления на основе облаков - это технология, которая позволяет использовать квантовые эмуляторы, симуляторы и процессоры, расположенные в облаке, для выполнения квантовых вычислений. Такая модель вычислений на основе облаков позволяет пользователям из разных мест получать доступ к квантовым вычислительным ресурсам без необходимости иметь собственное физическое оборудование.

Существует несколько платформ для квантовых вычислений. Вот некоторые из них:

1. **Xanadu Quantum Cloud:** Предоставляет облачную квантовую платформу с открытым исходным кодом для разработки и выполнения квантовых алгоритмов. Он основан на фреймворке с открытым исходным кодом "Strawberry Fields" и предлагает доступ к различным функциям и библиотекам квантового программирования.

2. **IBM Q:** IBM предлагает доступ к квантовым вычислениям через свою облачную платформу IBM Q. Она включает в себя Qiskit - фреймворк открытого исходного кода, который позволяет разработчикам создавать и запускать квантовые алгоритмы на компьютере или в режиме удаленного доступа.

3. Microsoft (Q#): Microsoft предоставляет Q# (Q Sharp) - язык программирования для квантовых вычислений. Он может быть использован для создания квантовых программ, а также обеспечивает интеграцию с классическими языками программирования, такими как C#.

4. Quantum Playground: Это браузерная платформа, разработанная Google, которая позволяет пользователям программировать и запускать квантовые алгоритмы на базе квантовых битов, известных как кубиты.

Кроме того, есть другие платформы и инструменты для квантовых вычислений, такие как Rigetti Quantum Cloud Services, Amazon Braket и NTT Research Quantum Computation and Information Theory (QCIT) Platform, каждая из которых предлагает свои функции и возможности для разработки и выполнения квантовых алгоритмов.

Самая сложная проблема при создании изделия и его ЦД - это декомпозиция системы на объекты, так как при принятии решения приходится учитывать много факторов: инкапсуляцию, глубину детализации, наличие зависимостей, гибкость, производительность, развитие, повторное использование и т.д.

### **Инкрементная объектно-ориентированная разработка**

Инкрементная объектно-ориентированная разработка, производство и эксплуатация цифровых двойников (ЦД), в сочетании с графодинамическим описанием физических объектов и технологиями позволит решить проблему декомпозиции изделия.

Эффективность подхода достигается за счет повторного использования программно-аппаратных компонентов, суррогатных моделей, интегрирующих

физические объекты с Интернетом вещей и графодинамическим описанием имитируемых объектов.

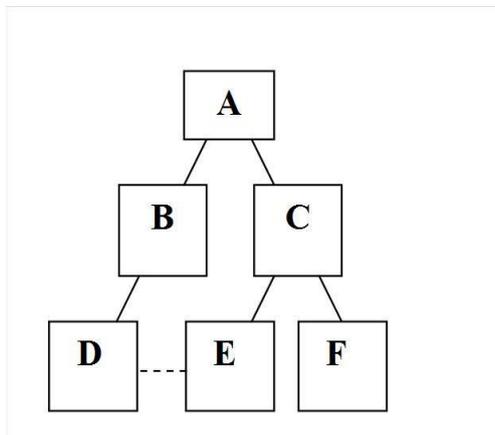


Рис 1. Граф  $G$

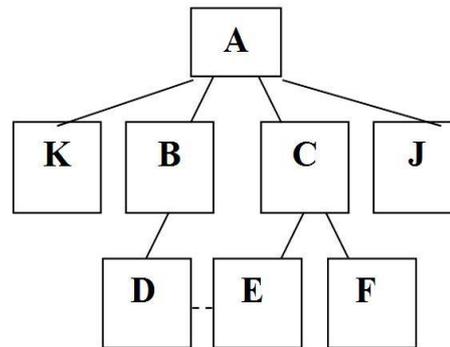
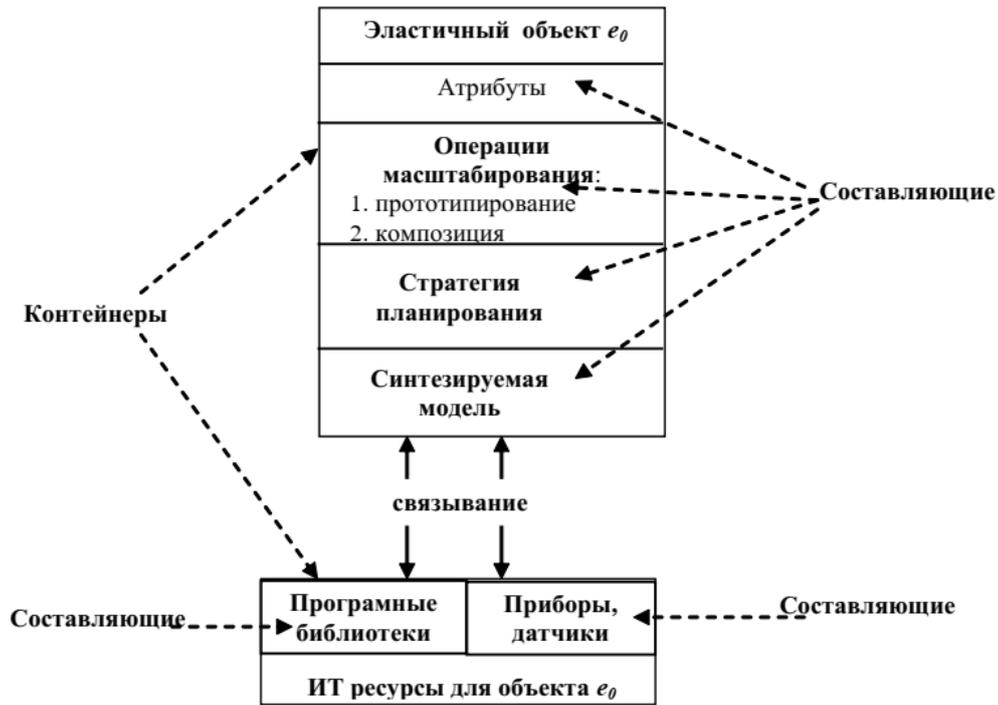


Рис 2. Граф  $G$  *пертурбации*

Инкрементная объектно-ориентированная разработка подразумевает иерархическое описание изделия  $G$  как объекта, состоящего из других объектов, например,  $A, B, C, D$  (Рис. 1). Изначально иерархия представляется в виде графа и является не полной.

Граф – это абстракция связности объектов в масштабе, как физических объектов, так и их квантового представления.

В предлагаемом объектно-ориентированном подходе к разработке ЦД предполагается применять эластичные объекты. Вычислительная модель эластичного объекта включает в себя математическое описание поведения объекта при изменении нагрузки.



Масштаб физической модели определяется при декомпозиции. Пусть процесс  $P$  разработки жизненного цикла изделия  $G$  состоит из подпроцессов  $p_1, p_2, \dots, p_n$  его составляющих жизненных циклов объектов, что может быть представлено как аппроксимация:

$$P(G) = p_m(\dots(p_2(p_1(G))), \text{ где}$$

для примера (см. Рис 1.)  $p_1$  (A G),  $p_2$  (B G), ...,  $p_m$  (F G), причем каждый из подпроцессов  $p_n$  некоторого объекта может тоже быть декомпозирован на множество подпроцессов. Фрактальная аппроксимация структуры [5, 6, 8] эластичных объектов и архитектуры ЦД, требует, чтобы интернет-устройства (датчики) имели возможность к масштабированию.

Таким образом жизненный цикл изделия при применении фрактального инкрементного объектно-ориентированного подхода обладает свойством

аппроксимации, что особенно важно при разработке изделий в аэрокосмической промышленности.

В настоящее время в аэрокосмической промышленности поставлены задачи по разработке ЦД для турбовинтового двигателя ТВ7-117СТ (самолёта Ил-112В), двухконтурного турбореактивного АИ-222-25 (Як-130) и семейства гражданских двигателей разработки ОДК [7] и задачи по разработке других ЦД.

Создание программно-технологической платформы для производства и применения ЦД в аэрокосмической промышленности с учетом процессов жизненного цикла (по ГОСТ Р 56135) становится актуальным [18, 19], и может реализовываться на основе предлагаемого подхода.

Развитие технологий ЦД в аэрокосмической отрасли требует оценки рисков, связанных со следующими факторами:

- интеграцией изделий, использующих технологию цифровых близнецов;
- все более усложняющейся оперативной деятельностью в окружающей среде, которая также создает проблемы для кибербезопасности оперативной среды;
- возможностью самих цифровых двойников снижать риски кибербезопасности и превращением их в неотъемлемую часть системы углубленной защиты.

## **Заключение**

1. Определены основные особенности создания ЦД в аэрокосмической промышленности.

2. Рассмотрены фундаментальные технологии для реализации ЦД: Iot, XR, Cloud вычисления, AI, квантовое моделирование, кибербезопасность.
3. Предложена методология фрактальной аппроксимации для разработки, производства и эксплуатации ЦД на основе эластичных объектов.
4. Предложена архитектура платформы для стадий ЦД.

### **Список источников**

1. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. - М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 15 с.
2. Yin H., Wang L. Application and development prospect of digital twin technology in aerospace // Procedia Manufacturing, 2019, no. 30, pp. 641-648. DOI:[10.1016/j.ifacol.2021.04.165](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.04.165)
3. What is a digital twin? | IBM. URL: <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>
4. Guo J., Lv Z. Application of Digital Twins in multiple fields // Multimedia Tools and Applications, 2022, vol. 81, pp. 9-12. DOI:[10.1007/s11042-022-12536-5](https://doi.org/10.1007/s11042-022-12536-5)
5. Elisa Negri et al. A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems // Procedia Manufacturing, 2017, vol. 11, pp. 939–948. DOI:[10.1016/j.promfg.2017.07.198](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198)
6. Semenov A.S. Prototype based Programming with Fractal Algebra // Conference: Computational mechanics and modern applied software systems (CMMASS'2019), November 2019, vol. 2181 (1), pp. 020009. DOI:[10.1063/1.5135669](https://doi.org/10.1063/1.5135669)

7. Семенов А.С. Моделирование самоорганизующихся процессов развития: фрактоидно-ориентированный подход: монография. – М.: МАИ, 2013. – 155 с.
8. Елисеев В., Мусеев А., Тамм А., Гаврилов П. Разработка Цифрового двойника турбовинтового двигателя ТВ7-117СТ-01 // Автоматизация проектирования. 2020. № 1-2. С. 67-77.
9. Semenov A.S. Graph-based Dynamic Analysis of Elastic Systems // 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2020, vol. 1, pp. 65-70. DOI: [10.1109/CoDIT49905.2020.9263986](https://doi.org/10.1109/CoDIT49905.2020.9263986)
10. Кузнецова С.В. Демонстрация в учебном процессе новых технологий .NET в разрезе создания сайтов, веб-сервисов и приложений // Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли АММАГ'2020 (Алушта, 6-13 сентября 2020). - М.: МАИ, 2020. С. 737-740.
11. Леонтьева И.Н. Особенности использования технологии «цифровой двойник» на этапе послепродажного обслуживания на примере автомобильной и аэрокосмической промышленности // Материалы II Национальной научно-образовательной конференции «Логистика: форсайт-исследования, профессия, практика» (Санкт-Петербург, 21 октября 2021). – СПб: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2021. С. 388-396.
12. Курганова Н.В., Филин М.А., Черняев Д.С. и др. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства // International Journal of Open Information Technologies. 2019. Т. 7. № 5. С. 105-115.

13. Реус С.П. Лучшие отечественные и зарубежные практики внедрения цифровых двойников в промышленности // II Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления интеграции науки, образования и производства (Керчь, 19–23 мая 2021): тезисы докладов. - Керчь: Керченский государственный морской технологический университет, 2021. С. 109-112.
14. Пенкин И.А., Шулаева Е.А. Преимущества применения цифровых двойников, и их дальнейшая перспектива развития // 8-я Международная научно-практическая конференция «Инновационные перспективы Донбасса» (Донецк, 24-26 мая 2022): сборник трудов. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2022. Т. 3. С. 17-21.
15. Кабанов А.А. Моделирование аэрокосмических производств: обзор технологий, методов и перспектив их использования в производствах будущего // Инженерный журнал: наука и инновации. 2022. № 10 (130). DOI: [10.18698/2308-6033-2022-10-2220](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-10-2220)
16. Терехина С.В. Инновационные тренды развития промышленности // УЭПС: управление, экономика, политика, социология. 2021. № 1. С. 55-63. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnye-trendy-razvitiya-promyshlennosti>
17. Блинов В.Л., Богданец С.В. Цифровые двойники турбомашин: учебное пособие. - Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2022. - 162 с.
18. Петров А. В. Имитация как основа технологии цифровых двойников // iPolytech Journal. 2018. Т. 22. № 10 (141). С. 56-66. DOI: [10.21285/1814-3520-2018-10-56-66](https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-56-66)

19. Куликов Г.Г., Сапожников А.Ю., Кузнецов А.А., Маврина А.С. Архитектура структуры цифрового двойника интегрированной it-платформы для распределенного, многовариантного проектирования объектов машиностроения // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2021. Т. 25. № 2 (92). С. 86-92. DOI: [10.54708/19926502\\_2021\\_2529286](https://doi.org/10.54708/19926502_2021_2529286)
20. Белов В.Ф., Гаврюшин С.С., Занкин А.И. Архитектура цифровой платформы исследования и проектирования инноваций в машино- и приборостроении // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 3 (732). С. 3-15. DOI: [10.18698/0536-1044-2021-3-3-15](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-3-3-15)
21. Кабанов А.А., Амосов М.В. VR/AR в изучении, создании и эксплуатации аэрокосмической техники: из макромира в микромир, от наблюдения к действиям // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171410>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-21](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-21)
22. Гончаров П.С., Копейка А.Л., Бабин А.М. Методика экспериментального моделирования воздействия излучения плазмы электрического ракетного двигателя на солнечные элементы // Труды МАИ. 2022. № 126. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168995>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-09](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-09)
23. Бродский М.С., Звонарев В.В., Хуббиев Р.В., Шерстюк А.В. Компьютерная модель радиоканала системы спутниковой связи и ретрансляции данных при многопозиционной передаче сигнала // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170340>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-10)

24. Вакульчик О.В. Кибербезопасность функционирования информационно-управляющей системы с участием SQL Server // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170343>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-13](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-13)

## References

1. *GOST R 57700.37–2021. Komp'yuternye modeli i modelirovanie. Tsifrovye dvoyniki izdelii* (GOST R 57700.37–2021 Computer models and modeling. Digital twin products), Moscow, Rossiiskii institut standartizatsii, 2021, 15 p.
2. Yin H., Wang L. Application and development prospect of digital twin technology in aerospace, *Procedia Manufacturing*, 2019, no. 30, pp. 641-648. DOI: [10.1016/j.ifacol.2021.04.165](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.04.165)
3. *What is a digital twin?* | IBM. URL: <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>
4. Guo J., Lv Z. Application of Digital Twins in multiple fields, *Multimedia Tools and Applications*, 2022, vol. 81, pp. 9-12. DOI: [10.1007/s11042-022-12536-5](https://doi.org/10.1007/s11042-022-12536-5)
5. Elisa Negri et al. A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems, *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 11, pp. 939–948. DOI: [10.1016/j.promfg.2017.07.198](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198)
6. Semenov A.S. Prototype based Programming with Fractal Algebra, *Conference: Computational mechanics and modern applied software systems (CMMASS'2019)*, November 2019, vol. 2181 (1), pp. 020009. DOI: [10.1063/1.5135669](https://doi.org/10.1063/1.5135669)
7. Semenov A.C. *Modelirovanie samoorganizuyushchikhsya protsessov razvitiya: fraktoidno-orientirovannyi podkhod* (Modeling of self-organizing development processes: a fractoid-oriented approach), Moscow, MAI, 2013, 155 p.

8. Eliseev V., Museev A., Tamm A., Gavrilov P. *Avtomatizatsiya proektirovaniya*, 2020, no. 1-2, pp. 67-77.
9. Semenov A.S. Graph-based Dynamic Analysis of Elastic Systems, *7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 2020, vol. 1, pp. 65-70. DOI: [10.1109/CoDIT49905.2020.9263986](https://doi.org/10.1109/CoDIT49905.2020.9263986)
10. Kuznetsova S.V. *Materialy XIII Mezhdunarodnoi konferentsii po prikladnoi matematike i mekhanike v aerokosmicheskoi otrasli AMMAI'2020*, Moscow, MAI, 2020, pp. 737-740.
11. Leont'eva I.N. *Materialy II Natsional'noi nauchno-obrazovatel'noi konferentsii «Logistika: forsait-issledovaniya, professiya, praktika»*, Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi ekonomicheskii universitet, 2021, pp. 388-396.
12. Kurganova N.V., Filin M.A., Chernyaev D.S. et al. *International Journal of Open Information Technologies*, 2019, vol. 7, no. 5, pp. 105-115.
13. Reus S.P. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Innovatsionnye napravleniya integratsii nauki, obrazovaniya i proizvodstva: tezis dokladov*, Kerch', Kerchenskii gosudarstvennyi morskoi tekhnologicheskii universitet, 2021, pp. 109-112.
14. Penkin I.A., Shulaeva E.A. *8-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Innovatsionnye perspektivy Donbassa»: sbornik trudov*, Donetsk: Donetskii natsional'nyi tekhnicheskii universitet, 2022, vol. 3, pp. 17-21.
15. Kabanov A.A. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2022, no. 10 (130). DOI: [10.18698/2308-6033-2022-10-2220](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-10-2220)

16. Terekhina S.V. *UEPS: upravlenie, ekonomika, politika, sotsiologiya*, 2021, no. 1, pp. 55-63. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnye-trendy-razvitiya-promyshlennosti>
17. Blinov V.L., Bogdanets S.V. *Tsifrovye dvoyniki turbomashin* (Digital twins of turbomachines), Ekaterinburg, Izd-vo Ural'skogo universiteta, 2022, 162 p.
18. Petrov A. V. *iPolytech Journal*, 2018, vol. 22, no. 10 (141), pp. 56-66. DOI: [10.21285/1814-3520-2018-10-56-66](https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-56-66)
19. Kulikov G.G., Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A.A., Mavrina A.S. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, vol. 25, no. 2 (92), pp. 86-92. DOI: [10.54708/19926502\\_2021\\_2529286](https://doi.org/10.54708/19926502_2021_2529286)
20. Belov V.F., Gavryushin S.S., Zankin A.I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2021, no. 3 (732), pp. 3-15. DOI: [10.18698/0536-1044-2021-3-3-15](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-3-3-15)
21. Kabanov A.A., Amosov M.V. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171410>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-21](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-21)
22. Goncharov P.S., Kopeika A.L., Babin A.M. *Trudy MAI*, 2022, no. 126. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168995>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-09](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-09)
23. Brodskii M.S., Zvonarev V.V., Khubbiev R.V., Sherstyuk A.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170340>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-10)
24. Vakul'chik O.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170343>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-13](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-13)

Статья поступила в редакцию 12.05.2023

Одобрена после рецензирования 14.07.2023

Принята к публикации 28.08.2023

The article was submitted on 12.05.2023; approved after reviewing on 14.07.2023;  
accepted for publication on 28.08.2023