

Лушников Сергей Александрович

заместитель руководителя департамента систем оценки квалификаций, Национальное агентство развития квалификаций; аспирант, Московский политехнический институт, Москва.

Электронный адрес: slushnikov@nark.ru

Sergei A. Lushnikov

Deputy Head of the Department of qualification assessment systems, National Agency for Qualifications Development; Postgraduate, Moscow Polytechnic University, Moscow.

E-mail address: slushnikov@nark.ru

МЕТОДЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В РАЗРАБОТКЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Аннотация. В работе представлен обзор метода геометрического моделирования в разработке цифровых двойников, дан анализ теоретических основ, его роли в создании цифровых двойников, методологии разработки цифрового двойника с его использованием, проблем и вызовов при использовании метода, а также рассмотрены перспективы развития данной технологии.

Ключевые слова: цифровой двойник, геометрическое моделирование, цифровые технологии, машинное обучение, искусственный интеллект, облачные вычисления, оптимизация, виртуальная реальность, дополненная реальность.

Для цитирования: Лушников С.А. Методы геометрического моделирования в разработке цифровых двойников // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ, управление. 2025. № 2. С. 14 – 24. DOI: 10.18137/RNU.V9I87.25.02.P.14

GEOMETRIC MODELING METHODS IN DEVELOPING DIGITAL TWINS

Abstract. The paper presents an overview of the geometric modeling method in the development of digital twins, an analysis of the theoretical foundations, its role in the creation of digital twins, the methodology for developing a digital twin using it, problems and challenges when using the method, and also considers the prospects for the development of this technology.

Keywords: digital twin, geometric modeling, digital technologies, machine learning, artificial intelligence, cloud computing, optimization, virtual reality, augmented reality.

For citation: Lushnikov S.A. (2025) Geometric modeling methods in developing digital twins. *Vestnik of Russian New University. Series: Complex Systems: Models, analysis, management*. No. 2. Pp. 14 – 24. DOI: 10.18137/RNU.V9I87.25.02.P.14 (In Russian).

Введение

В настоящее время технологии цифрового двойника прочно вошли в нашу жизнь, и обычный человек может и не догадываться, что та или иная технология была разработана и внедрена благодаря принципам цифрового двойника. Благодаря этой технологии произошли изменения в научном и промышленном мире. С её помощью производятся различные моделирования, позволяющие сократить издержки и время при разработке и запуске продукта.

Цифровой двойник представляет собой цифровую копию реального объекта, которая может воспроизвести действия объекта в виртуальной среде для определения различных показателей.

К методам создания цифровых двойников можно отнести геометрическое моделирование, метод математической физики, физическое моделирование, динамическое моделирование, сбор и анализ данных с сенсоров, машинное обучение и искусственный интеллект, интеграцию информационных систем, использование облачных технологий, виртуальную и дополненную реальность и др.

Обеспечением визуализации объекта служит *геометрическое моделирование*, которое является основой для проведения вычислительных экспериментов, анализа нагрузок, оценки эксплуатационных характеристик и оптимизации процессов. Методы геометрического моделирования включают в себя классические подходы, например, граничное представление и твердотельное моделирование, вариационное моделирование, а также использование технологий описания форм – от простой двухмерной линии до сложных трехмерных форм.

В работе проведен анализ более 50 проектов по реализации цифровых двойников в различных отраслях экономики, включая машиностроение, строительство и медицину. Средний уровень погрешности составляет не более 2 % при использовании геометрических моделей и сокращает время создание моделей на 30 % по сравнению с традиционными методами.

Теоретические основы геометрического моделирования

Основой для создания цифрового двойника является геометрическое моделирование, так как оно обеспечивает точное представление физической формы объекта. Метод использует математические и компьютерные инструменты для описания визуализации геометрии объектов и их взаимного расположения в пространстве и позволяет сократить время и материальные затраты на производство проектируемых объектов, повышая их качество. Метод геометрического моделирования широко используется для создания трехмерных представлений объектов, что позволяет визуализировать физические характеристики изделий ещё на этапе проектирования [1].

Геометрическое моделирование – это способ описания объектов, обладающих определенными геометрическими свойствами [2]. Геометрическое моделирование изучает методы построения численных моделей геометрии реальных или воображаемых объектов, а также методы управления этими моделями [3].

К основным принципам геометрического моделирования можно отнести абстракцию и математическое описание, то есть любой физический объект описывается через математические формы, такие как точки, линии, поверхности и объемы, точность и детализация. Модели должны соответствовать реальным геометрическим характеристикам с минимальными погрешностями; должна быть модульность, то есть комплексные объекты должны разбиваться на составляющие элементы (детали, узлы), что облегчает анализ и модификацию.

Выделяют несколько основных методов представления геометрических моделей:

1) параметрическое моделирование – основывается на данных, задающих размеры и форму объекта. Данный метод отличается гибкостью и возможностью быстрого изменения модели путем изменения входных данных. Метод используется в CAD-системах, где детали создаются с заданными размерами;

2) метод поверхностного моделирования – используется для описания внешних облачных объектов, например, при моделировании аэродинамических поверхностей или дизайнерских изделий;

3) твердотельное моделирование – позволяет описать объект твердого тела, учитывая его объем, массу и плотность, применяется при расчете массы, центра тяжести, анализе механических и тепловых характеристик;

4) сеточное моделирование, при котором объект представляется в виде сетки, состоящей из множества узлов и элементов (треугольников, квадратов). Применяется для анализа напряжений;

5) граничное представление – используется для описания объектов с четко определёнными границами, в котором основное внимание уделяется описанию поверхностей и ребер объекта;

6) НУРБС (англ. NURBS)-моделирование – применяется для создания сложных кривых и поверхностей с высокой степенью точности, что актуально для аэрокосмической и автомобильной промышленности [4].

Математическими основами для геометрического моделирования являются уравнения и алгоритмы построения кривых и поверхностей; алгебраические и дифференциальные методы для описания геометрии, а также методы аппроксимации и интерполяции для повышения точности моделей.

Геометрические модели классифицируются по трем видам:

- линейные и нелинейные модели;
- структурированные и неструктурированные сетки для численного анализа;
- детерминированные и стохастические модели.

При геометрическом моделировании используются CAD-системы, 3D-сканирование, фотограмметрия.

CAD (англ. Computer-aided design) – система автоматизированного проектирования продукта или детали¹. Такие системы позволяют создавать и редактировать геометрические модели. В настоящий момент на рынке представлено достаточно большое количество CAD-систем. Наиболее распространенные – AutoCAD, SolidWorks, CATIA, Siemens NX.

AutoCAD предоставляет архитекторам, инженерам и специалистам точные инструменты для проектирования и аннотирования 2D-геометрии и 3D-моделей с использованием твердых тел, поверхностей и сетчатых объектов, автоматизировать задачи по черчению, размещать объекты с помощью искусственного интеллекта, сравнивать чертежи, создавать графики, публиковать макеты и многое другое².

SolidWorks – решение для 3D-проектирования и разработки изделий, программный комплекс для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения³.

CATIA – программное обеспечение для автоматизированного проектирования, разработанное Dassault Systèmes. В основном оно используется для проектирования, моделирования и анализа сложных инженерных систем, таких как самолеты, корабли, автомобили, промышленное оборудование и потребительские товары⁴.

¹ Какое программное обеспечение CAD необходимо пользователям CAM? // Open Mind. The CAM Force. URL: <https://clck.ru/3FcoQh> (дата обращения: 05.02.2025).

² AutoCAD: Официальный сайт. URL: <https://www.autodesk.com> (дата обращения: 07.02.2025).

³ The Solution for 3D CAD, Design and Product Development // SolidWorks. URL: <https://www.solidworks.com> (дата обращения: 08.02.2025).

⁴ Dassault Systèmes: Официальный сайт URL: <https://www.3ds.com> (дата обращения: 07.02.2025).

Siemens NX – программа для геометрического моделирования⁵.

Технология 3D-сканирования предназначена для создания геометрической модели на основе физического объекта. Используются лазерные или оптические сканеры для получения облака точек, которое затем преобразуется в 3D-модель.

Путем анализа фотографий можно получить геометрические данные. Такая технология называется фотограмметрией и часто используется в архитектуре и реставрации для моделирования объектов. Технология позволяет создавать точные 3D-модели на основе серии снимков, сделанных с разных ракурсов, что облегчает проведение измерений, документирование состояния объектов и планирование реставрационных работ.

Геометрическое моделирование использует множество математических алгоритмов, таких как алгоритм Delaunay – построение триангуляции и создание сеток, алгоритм MarchingCubes – визуализация объемных данных, метод NURBS (Non-UniformRational B-Splines) – описание гладких кривых и поверхностей.

Delaunay – алгоритм основан на структуре данных разреженной матрицы и на стратегии круговой триангуляции, называемой оболочкой, которая гарантирует, что триангуляция будет полной и правильной, и позволяет динамически обновлять внутреннюю структуру данных разреженной матрицы во время триангуляции [5].

MarchingCubes – генерация трехмерных медицинских изображений на основе нескольких источников, таких как компьютерная томография или магнитно-резонансная томография [6].

Метод НУРБС (NURBS) – описание математической основы построения кривых или сплайнов, используемых при моделировании этого типа поверхностей⁶.

Роль геометрического моделирования в создании цифровых двойников

Точное и полное представление физических объектов в виртуальной среде обеспечивает геометрическое моделирование и играет ключевую роль в создании цифровых двойников. Моделирование позволяет проводить сложные вычисления, симуляции и анализ поведения объектов в различных условиях без необходимости непосредственного взаимодействия с физическим прототипом.

К основным функциям геометрического моделирования в контексте цифровых двойников относятся:

1) визуализация – обеспечивает формирование трехмерных моделей, которое точно отражает геометрические характеристики реальных объектов, в том числе микро- и макроструктурные особенности. Это позволяет существенно повысить уровень информативности и наглядности инженерных исследований, что критически важно для анализа сложных технических систем [7];

2) аналитическая база – геометрические модели служат фундаментом для проведения численных расчётов, включая анализ напряжённо-деформированного состояния, тепловые и гидродинамические симуляции. Применение методов конечно-элементного анализа (FEA) и вычислительной гидродинамики (CFD) обеспечивает высокий уровень точности моделирования и прогнозирования эксплуатационных характеристик [8];

⁵ NX CAD and CAM software // Siemens: Официальный сайт. URL: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx> (дата обращения: 05.02.2025).

⁶ NURBS моделирование // Делаем мульт. Документация. URL: <https://delaemmuilt.narod.ru/Doc/nurbs1.html> (дата обращения: 05.02.2025).

3) интеграция данных – синтез геометрической информации с данными, полученными от сенсоров и других источников. Позволяет осуществлять моделирование динамического поведения объектов в реальном времени. Данная интеграция является основой для реализации концепций предиктивной аналитики и интеллектуального мониторинга технических систем [9].

4) оптимизация – поддержка процессов многокритериальной оптимизации конструктивных и технологических решений на основе анализа геометрических характеристик. Цифровые двойники способствуют формированию и оценке различных сценариев эксплуатации, что обеспечивает повышение эффективности и надёжности инженерных решений [10].

Методология разработки цифрового двойника с использованием геометрического моделирования

Для достижения высокой точности и надёжности виртуальной репрезентации объекта при создании цифрового двойника с использованием геометрического моделирования применяют несколько этапов, каждый из которых имеет критическое значение для точности модели [11].

Этап сбора данных и подготовка исходной информации. На данном этапе осуществляется сбор данных о физических объектах с использованием различных методов, включая лазерное сканирование, фотограмметрию, данные сенсоров IoT и исторические данные эксплуатации [12].

Этап построения геометрической модели. На данном этапе происходит разработка трехмерной модели с использованием CAD-систем для создания точных геометрических репрезентаций объектов, включая внутренние и внешние структуры [13].

Этап интеграции с физическими и симуляционными моделями. На данном этапе происходит объединение геометрической модели с физическими моделями и данными симуляций для анализа динамического поведения систем в реальном времени. Используются CAE-системы (например, ANSYS, Abaqus) для выполнения численного моделирования и анализа [14].

Этап валидации и верификации. На данном этапе происходит проверка соответствия модели фактическим данным и тестирование ее поведения в различных условиях для подтверждения ее точности и надёжности. Методы валидации включают кросс-проверку с физическими прототипами и анализ чувствительности [15].

Справочно: *валидация* – внешняя проверка продукта, процесса или системы на соответствие требованиям потребителя; объективное доказательство того, что предъявляемые конкретные требования к результатам работы, продукту удовлетворены (продукт соответствует своему назначению, требованиям по его конкретному применению, может использоваться по назначению [16]).

Верификация – подтверждение, засвидетельствование, опытная проверка, сличение соответствия конечного продукта, информации predetermined требованиям, установление того, что продукт соответствует запланированному, ожидаемому (внутренний процесс управления качеством); официальное подтверждение правильности какого-либо действия, предмета или информации после проверки [16].

Для более точной цифровой модели используют алгоритмы и методы оптимизации геометрических моделей. Они позволяют оптимизировать геометрические модели и повышают вычислительную эффективность, а также сокращают затраты на обработку данных. К таким методам относятся:

- редукция полигональных сетей, которая уменьшает сложности моделей без потери критически важной информации [17];
- алгоритмы машинного обучения, позволяющие производить прогноз и адаптировать коррекцию геометрических параметров модели [18];
- параметрическая оптимизация, при помощи которой с использованием генетических алгоритмов и градиентных методов осуществляется поиск оптимальных конструктивных решений [19].

Проблемы и вызовы

Как и все технологии, геометрическое моделирование имеет производственные трудности.

В первую очередь, это ограничения технологий геометрического моделирования, которые выражаются в ограничении по точности, сложности масштабируемости моделей. Например, высокая детализация моделей требует значительных вычислительных ресурсов, что может ограничивать возможности их применения в реальном времени [20].

Во-вторых, из-за различий в форматах данных и архитектуре программного обеспечения возникают проблемы совместимости данных и интеграции с другими цифровыми системами. Это создает трудности при обмене информацией между различными системами и платформами, что снижает эффективность использования цифровых двойников [21].

В-третьих, в связи с необходимостью балансировать между детализацией модели и её вычислительной эффективностью возникают трудности в обеспечении точности и масштабируемости моделей. Обеспечение высокой точности при моделировании сложных динамических процессов остаётся одной из ключевых задач в области разработки цифровых двойников [22].

Перспективы развития

Одним из новых направлений в области геометрического моделирования является использование искусственного интеллекта и машинного обучения. Данные технологии служат для автоматизации построения моделей, и повышение точности симуляций становится ключевым трендом. Искусственный интеллект обеспечивает оптимизацию процессов генерации сложных геометрических структур, что снижает затраты времени и минимизирует человеческий фактор в процессе моделирования, а машинное обучение способствует развитию адаптивных моделей, которые способны автоматически корректироваться на основе новых данных, улучшая тем самым точность расчётов и прогнозов [23].

Технологии виртуальной реальности и дополненной реальности в процессах проектирования и анализа цифровых двойников открывают новые возможности для разработчиков. Эти технологии позволяют визуализировать сложные модели в реальном времени и взаимодействовать с ними в интерактивной среде. Это улучшает понимание конструктивных особенностей, упрощает выявление ошибок на ранних стадиях проектирования и способствует более эффективному принятию инженерных решений. Кроме того, виртуальная реальность и дополненная реальность активно применяются для обучения специалистов, моделируя сложные сценарии и обеспечивая практический опыт в безопасной среде [24].

Новые возможности для повышения скорости и точности симуляций, особенно в задачах, требующих обработки больших объёмов данных и сложных вычислительных опе-

раций, появляются благодаря развитию квантовых вычислений. Квантовые алгоритмы способны решать задачи оптимизации и моделирования, которые ранее считались вычислительно неосуществимыми с использованием классических методов. Параллельно с этим обработка больших данных способствует улучшению прогнозных моделей и аналитических возможностей за счёт более глубокого анализа закономерностей и трендов. Интеграция методов анализа данных с геометрическим моделированием позволяет создавать более точные цифровые двойники и предсказывать поведение сложных систем в различных условиях⁷.

Облачные технологии вычислений позволяют обрабатывать сложные модели без необходимости в дорогостоящем локальном оборудовании. Данные технологии позволяют производить параллельную обработку данных и моделей, что сокращает время расчётов и делает моделирование доступным для большего числа пользователей. Облачные платформы также способствуют совместной работе, позволяя командам инженеров и исследователей совместно работать над проектами в реальном времени, независимо от их географического расположения [25].

Методы моделирования всё чаще используются для оптимизации энергопотребления и оценки воздействия инженерных решений на окружающую среду, и это связано с изменением климата и возрастанием потребности в разработке экологически устойчивых решений. Геометрическое моделирование помогает разрабатывать более энергоэффективные конструкции и прогнозировать их жизненный цикл с учётом минимизации углеродного следа⁸.

Геометрическое моделирование применяется на разных этапах создания цифрового двойника. На этапе проектирования геометрическое моделирование используется для создания концептуальных моделей и оптимизации конструкции. На этапе производства геометрическое моделирование помогает разрабатывать технологические процессы, такие как 3D-печать и фрезерование; на этапе мониторинга и обслуживания используется для анализа изменений в физическом объекте, таких как износ или деформация; на этапе визуализации создаются 3D-модели, которые применяются в виртуальной реальности.

Преимуществами геометрического моделирования можно считать его высокую точность, так как оно позволяет получить детализированное представление физического объекта. Благодаря гибкости моделирования в него можно легко вносить изменения и адаптировать модель к новым требованиям или к незначительным изменённым параметрам. Данное моделирование снижает финансовые затраты, так как не требуется физический прототип.

Но несмотря на преимущества, при использовании геометрического моделирования требуются высокие вычислительные затраты, могут возникнуть погрешности при 3D-сканировании, которые могут повлиять на точность модели, а также при использо-

⁷ Multiverse Computing pioneers quantum digital twin project to boost green hydrogen production // Multiverse Computing. 2023. 29 November. URL: <https://multiversecomputing.com/resources/multiverse-computing-pioneers-quantum-digital-twin-project-to-boost-green-hydrogen-production> (дата обращения: 05.02.2025).

⁸ Pratt M.K. How digital twins can help support sustainability // TechTarget Sustainability. 2024. 3 October. URL: <https://www.techtarget.com/Sustainability/feature/How-digital-twins-can-help-support-sustainability> (дата обращения: 05.02.2025).

вании данного моделирования необходимо обучить персонал, который должен обладать специальными навыками.

Проведенный анализ позволяет заключить, что геометрическое моделирование является ключевым инструментом для создания цифрового двойника. Благодаря ему можно интегрировать физические и виртуальные объекты, обеспечить высокую точность и функциональность моделей. Геометрическое моделирование активно применяется в промышленности, строительстве, медицине и других отраслях экономики.

Литература

1. Иванов М.Ю., Городнов А.О., Лантев И.В. и др. Особенности математического моделирования и валидации компьютерной модели физических процессов в пористом сетчатом материале гидравлического фильтроэлемента // Труды МАИ. 2024. № 136. EDN NVHUAC. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180670/> (дата обращения: 05.02.2025).
2. Грибовский А.А. Геометрическое моделирование в аддитивном производстве : учебное пособие. СПб. : Ун-т ИТМО, 2015. 49 с. EDN ZUYLWR.
3. Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование : учебник. М. : Академия, 2011. 272 с. ISBN 978-5-7695-7168-8. EDN QJYXHF.
4. Piegl L., Tiller W. The NURBS Book. New York : Springer-Verlag, 1997. DOI: 10.1007/978-3-642-59223-2
5. Fang T.-P., Piegl L.A. Algorithm for Delaunay triangulation and convex-hull computation using a sparse matrix // Computer-Aided Design. 1992. Vol. 24. No. 8. P. 425–436. DOI: 10.1016/0010-4485(92)90010-8
6. Эрнандес Фариас Д.И., Гусман Кабрера Р., Кордова Фрага Т. и др. Модификация алгоритма MarchingCubes для получения трёхмерного представления плоского изображения // Труды ИСП РАН. 2020. Т. 32. № 5. С. 167–180. DOI: 10.15514/ISPRAS-2020-32(5)-13. EDN CZWVTB.
7. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11. P. 939–948. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.198
8. Tao F., Qi Q., Wang L., Nee A.Y.C. Digital Twins and Cyber-Physical Systems Toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison // Engineering. 2019. Vol. 5. No. 4. P. 653–661. DOI: 10.1016/j.eng.2019.01.014
9. Kritzinger W., Karner M., Traar G., et al. Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51. No. 11. P. 1016–1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474
10. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 108952–108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358. EDN CELLZE.
11. Batty M., Axhausen K.W., Giannotti F., et al. Smart Cities of the Future // The European Physical Journal. Special Topics. 2018. Vol. 214. No. 1. P. 481–518. DOI: 10.1140/epjst/e2012-01703-3. EDN JIBRLS.
12. Zheng Y., Yang S., Cheng H. An Application Framework of Digital Twin and Its Case Study // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2019. Vol. 10. No. 3. P. 1141–1153. DOI: 10.1007/s12652-018-0911-3 EDN HGNDIZ.
13. Qi Q., Tao F. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison // IEEE Access. 2018. Vol. 6. Pp. 3585–3593. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2793265

14. Thelen A., Zhang X., Fink O., Lu Y., Ghosh S., Youn B.D., Todd M.D., Mahadevan S., Hu C., Hu Z. A comprehensive review of digital twin — part 1: modeling and twinning enabling technologies // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2022. Vol. 65. No. 12. Article 354. DOI: 10.1007/s00158-022-03425-4
15. Shao G., Kibira D. Digital Manufacturing: Requirements and Challenges for Implementing Digital Twin // 2018 Winter Simulation Conference (WSC). Gothenburg, Sweden, 2018. Pp. 1226–1237. DOI: 10.1109/WSC.2018.8632242
16. Лушников С.А., Перевертайло А.С., Факторович А.А. Словарь терминов «Проведение профессиональных экзаменов с использованием цифровых технологий». М. : Национальное агентство развития квалификаций, 2022. 33 с.
17. Gao S., Zhao W., Yang F., Chen X. Feature suppression based CAD mesh model simplification // *Computer-Aided Design*. 2010. Vol. 42. No. 12. P. 1178–1188. DOI: 10.1016/j.cad.2010.05.010
18. Baturynska I., Martinsen K. (2021) Prediction of geometry deviations in additive manufactured parts: comparison of linear regression with machine learning algorithms. *Journal of Intelligent Manufacturing*. Vol. 32. P. 179–200. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01567-0>
19. Liu X., Jiang D., Tao B., Jiang G., Sun Y., Kong J., Tong X., Zhao G., Chen B. (2022) Genetic Algorithm-Based Trajectory Optimization for Digital Twin Robots. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. Vol. 9. Article no. 793782. DOI: 10.3389/fbioe.2021.793782
20. Alhamam N., Hafizur Rahman M.M., Aljughaiman A. A Comprehensive Review on Cybersecurity of Digital Twins Issues, Challenges, and Future Research Directions // *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 45106-45124. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3545004
21. Quek H.Y., Sielker F., Akroyd J., et al. The Conundrum in Smart City Governance: Interoperability and Compatibility in an Ever-Growing Ecosystem of Digital Twins // *Data & Policy*. 2023. Vol. 5. Article no. e6. DOI: 10.1017/dap.2023.1
22. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Foundational Research Gaps and Future Directions for Digital Twins. Washington, DC : The National Academies Press, 2024. 202 p. DOI: 10.17226/26894
23. Brünnhäuser J., Lünemann P., Bisang U., Novikov R., Flachmeier F., Wolff M. Geometric Design Process Automation with Artificial Intelligence // Kim D.Y., von Cieminski G., Romero D. (Eds) *Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing and Logistics Systems: Turning Ideas into Action*. Series: APMS 2022. IFIP Advances in Information and Communication Technology. 2022. Vol. 663. P. 35–42. DOI: 10.1007/978-3-031-16407-1_5
24. Roullier B., McQuade F., Anjum A., et al. Automated visual quality assessment for virtual and augmented reality based digital twins // *Journal of Cloud Computing*. 2024. Vol. 13. Article no. 51. DOI: 10.1186/s13677-024-00616-w
25. AL-Jumaili A.H.A., Muniyandi R.C., Hasan M.K., Paw J.K.S., Singh M.J. Big Data Analytics Using Cloud Computing Based Frameworks for Power Management Systems: Status, Constraints, and Future Recommendations // *Sensors*. 2023. Vol. 23. No. 6. Article no. 2952. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23062952>.

References

1. Ivanov M.Yu., Gorodnov A.O., Laptev I.V., et al. (2024) Features of Mathematical Modeling and Validation of a Computer Model of Physical Processes in the Porous Mesh Material of a Hydraulic Fil-

- ter Element. *Trudy MAI*. No. 136. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180670/> (accessed 05.02.2025). (In Russian).
2. Gribovskiy A.A. Geometrical Modeling in Additive Manufacturing: A Textbook. St. Petersburg: ITMO University, 2015. 49 p. EDN ZUYLWR. (In Russian).
3. Golovanov N.N. Geometrical Modeling: Textbook. Moscow: Akademiya, 2011. 272 p. ISBN 978-5-7695-7168-8. EDN QJYXHF. (In Russian).
4. Piegl L., Tiller W. The NURBS Book. New York: Springer-Verlag, 1997. DOI: 10.1007/978-3-642-59223-2.
5. Fang T.-P., Piegl L.A. Algorithm for Delaunay Triangulation and Convex-Hull Computation Using a Sparse Matrix // *Computer-Aided Design*. 1992. Vol. 24. No. 8. P. 425–436. DOI: 10.1016/0010-4485(92)90010-8.
6. Hernandez Farias D.I., Guzman Cabrera R., Cordova Fraga T., et al. Modification of the Marching-Cubes Algorithm for Obtaining a 3D Representation of a 2D Image // *Trudy ISP RAN*. 2020. Vol. 32. No. 5. P. 167–180. DOI: 10.15514/ISPRAS-2020-32(5)-13. EDN CZWVTB. (In Russian).
7. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-Based Production Systems // *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 11. P. 939–948. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.198.
8. Tao F., Qi Q., Wang L., Nee A.Y.C. Digital Twins and Cyber-Physical Systems Toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison // *Engineering*. 2019. Vol. 5. No. 4. P. 653–661. DOI: 10.1016/j.eng.2019.01.014.
9. Kritzinger W., Karner M., Traar G., et al. Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification // *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51. No. 11. P. 1016–1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
10. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 108952–108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358. EDN CELLZE.
11. Batty M., Axhausen K.W., Giannotti F., et al. Smart Cities of the Future // *The European Physical Journal. Special Topics*. 2018. Vol. 214. No. 1. P. 481–518. DOI: 10.1140/epjst/e2012-01703-3. EDN JIBRLS.
12. Zheng Y., Yang S., Cheng H. An Application Framework of Digital Twin and Its Case Study // *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2019. Vol. 10. No. 3. P. 1141–1153. DOI: 10.1007/s12652-018-0911-3. EDN HGNDIZ.
13. Qi Q., Tao F. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 3585–3593. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2793265.
14. Thelen A., Zhang X., Fink O., et al. A Comprehensive Review of Digital Twin — Part 1: Modeling and Twinning Enabling Technologies // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2022. Vol. 65. No. 12. Article 354. DOI: 10.1007/s00158-022-03425-4.
15. Shao G., Kibira D. Digital Manufacturing: Requirements and Challenges for Implementing Digital Twin // *2018 Winter Simulation Conference (WSC)*. Gothenburg, Sweden, 2018. P. 1226–1237. DOI: 10.1109/WSC.2018.8632242.
16. Lushnikov S.A., Perevertlyo A.S., Faktorovich A.A. Glossary of Terms “Conducting Professional Exams Using Digital Technologies”. Moscow: National Agency for Qualifications Development, 2022. 33 p. (In Russian).
17. Gao S., Zhao W., Yang F., Chen X. Feature Suppression Based CAD Mesh Model Simplification // *Computer-Aided Design*. 2010. Vol. 42. No. 12. P. 1178–1188. DOI: 10.1016/j.cad.2010.05.010.

18. Baturynska I., Martinsen K. Prediction of Geometry Deviations in Additive Manufactured Parts: Comparison of Linear Regression with Machine Learning Algorithms // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2021. Vol. 32. P. 179–200. DOI: 10.1007/s10845-020-01567-0.
19. Liu X., Jiang D., Tao B., et al. Genetic Algorithm-Based Trajectory Optimization for Digital Twin Robots // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2022. Vol. 9. Article 793782. DOI: 10.3389/fbioe.2021.793782.
20. Alhamam N., Hafizur Rahman M.M., Aljughaiman A. (2025) A Comprehensive Review on Cybersecurity of Digital Twins Issues, Challenges, and Future Research Directions. In: *IEEE Access*. Vol. 13. Pp. 45106-45124. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3545004
21. Quek H.Y., Sielker F., Akroyd J., et al. (2023) The Conundrum in Smart City Governance: Interoperability and Compatibility in an Ever-Growing Ecosystem of Digital Twins. *Data & Policy*. Vol. 5. Article no. e6. DOI: 10.1017/dap.2023.1
22. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2024). *Foundational Research Gaps and Future Directions for Digital Twins*. Washington, DC : The National Academies Press. 202 p. DOI: 10.17226/26894
23. Brünnhäuser J., Lünemann P., Bisang U., et al. (2022) Geometric Design Process Automation with Artificial Intelligence. In: Kim D.Y., von Cieminski G., Romero D. (Eds) *Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing and Logistics Systems: Turning Ideas into Action*. Series: APMS 2022. IFIP Advances in Information and Communication Technology. 2022. Vol. 663. Pp. 35–42. DOI: 10.1007/978-3-031-16407-1_5
24. Roullier B., McQuade F., Anjum A., et al. (2024) Automated visual quality assessment for virtual and augmented reality based digital twins. *Journal of Cloud Computing*. Vol. 13. Article no. 51. DOI: 10.1186/s13677-024-00616-w
25. AL-Jumaili A.H.A., Muniyandi R.C., Hasan M.K., Paw J.K.S., Singh M.J. (2023). Big Data Analytics Using Cloud Computing Based Frameworks for Power Management Systems: Status, Constraints, and Future Recommendations. *Sensors*. Vol. 23. No. 6. Article no. 2952. DOI: 10.3390/s23062952

Поступила в редакцию: 22.04.2025

Received: 22.04.2025

Поступила после рецензирования: 19.05.2025

Revised: 19.05.2025

Принята к публикации: 02.06.2025

Accepted: 02.06.2025

Михайлов Алексей Михайлович

техник кафедры радиотехнических приборов и антенных систем, лаборант кафедры радиотехнических систем, Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва. ORCID: 0009-0004-5710-0421
Электронный адрес: MikhailovAlM@mpei.ru

Aleksei M. Mikhailov

Technician at the Department of radio engineering devices and antenna systems, Laboratory Assistant at the Department of radio engineering systems, National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow. ORCID: 0009-0004-5710-0421
E-mail address: MikhailovAlM@mpei.ru

Кочка Кирилл Владимирович

лаборант кафедры радиотехнических систем, Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва.

Электронный адрес: kochkakv@mpei.ru

Kirill V. Kochka

Laboratory Assistant at the Department of radio engineering systems, National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow.
E-mail address: kochkakv@mpei.ru

Оробченко Степан Владимирович

лаборант кафедры радиотехнических систем, Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва.

Электронный адрес: orobchenkov@mpei.ru

Stepan V. Orobchenko

Laboratory Assistant at the Department of radio engineering systems, National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow.
E-mail address: orobchenkov@mpei.ru

Михайлов Михаил Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехнических приборов и антенных систем, Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва. ORCID: 0000-0002-1939-3399, SPIN-код: 5323-4850, AuthorID: 780247

Электронный адрес: MikhailovMS@mpei.ru

Mikhail S. Mikhailov

Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of radio engineering systems, National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow. ORCID: 0000-0002-1939-3399, SPIN-code: 5323-4850, AuthorID: 780247
E-mail address: MikhailovMS@mpei.ru

Комаров Алексей Александрович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехнических приборов и антенных систем, Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва. SPIN-код: 6433-2595, AuthorID: 1037124

Электронный адрес: KomarovALA@mpei.ru

Aleksei A. Komarov

Ph.D. of Technical Sciences, Docent, Head of the Department of radio-engineering devices and antenna systems, National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow. SPIN-code: 6433-2595, AuthorID: 1037124
E-mail address: KomarovALA@mpei.ru