

Научная статья
УДК 004.65
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2026-3-47-55>
EDN GPKLAS

Разработка принципов и критериев построения цифрового двойника робототехнического комплекса

Михаил Дмитриевич Гладышев

*Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева,
Астрахань, Россия, glad.mi@yandex.ru*

Аннотация. Цифровые двойники робототехнических комплексов демонстрируют эффективность в части экономии времени, бюджетов, повышения точности предсказания рисков. Цифровые двойники являются перспективной технологией, сочетающей современные способы обработки данных, предсказания состояния, однако основные аспекты технологии четко не определены. Предложено описание технологии цифровых двойников не в абстрактных терминах и понятиях, сочетающих расплывчатость и адаптивность, а в формализованных принципах и критериях для рассматриваемой системы, обеспечивающих геометрическое, кинематическое и информационное соответствие физическому объекту. Рассматривается концептуальная схема построения системы цифрового двойника в виде конкретных этапов с описанием тех или иных процедур, которые проходит разработчик в процессе построения робототехнического комплекса. Сформулированы 4 принципа, описывающие общие правила и закономерности построения отдельных подсистем, входящих в состав цифрового двойника. На основе принципов сформулированы не абстрактные, а конкретные группы критериев: геометрия и кинематика, динамика и поведение, связь и синхронизация. Каждая из групп захватывает ключевые особенности цифрового двойника, что повышает итоговое качество системы. Сформулированные группы критериев обеспечат единую и понятную классификацию существующих и будущих разработок, что позволит стандартизировать построение сложных робототехнических комплексов, обеспечивающих высокую точность и идентичность физическим. Разработан алгоритм работы цифрового двойника, объединяющий предложенные принципы и критерии, включающий взаимосвязанные модели и компоненты, которые отображают состояние робота в реальном времени с прогнозом до 10 с. Алгоритм сравнивает прогноз с реальными данными и при необходимости запускает калибровку, образуя замкнутый контур для повышения точности.

Ключевые слова: цифровой двойник, робототехнический комплекс, принципы, критерии, алгоритм, физическая модель

Для цитирования: Гладышев М. Д. Разработка принципов и критериев построения цифрового двойника робототехнического комплекса // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2026. № 3. С. 47–55. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2026-3-47-55>. EDN GPKLAS.

Original article

Development of principles and criteria for building a digital twin of a robotic complex

Mihail D. Gladishev

*Astrakhan Tatishchev State University,
Astrakhan, Russia, glad.mi@yandex.ru*

Abstract. Digital twins of robotic systems show efficiency to save time, budgets, improve accuracy, and predict risks. Digital twins, on the one hand, are a promising technology that combines modern methods of data processing, state prediction, and on the other hand, the main aspects of the technology are not clearly defined. The work proposes to describe the technology of digital twins not by abstract terms and concepts that combine vagueness and adaptability, but to formalize the principles and criteria for the system under consideration, ensuring geometric, kinematic and informational correspondence to a physical object. A conceptual scheme for building a digital twin system in the form of specific stages with a description of certain procedures that the developer goes through in the process of building a robotic complex is considered. Four principles are formulated that describe the general rules and laws of construction of individual subsystems that are part of the digital twin. Based on the principles, not abstract, but specific 3 groups of

criteria are formulated: geometry and kinematics, dynamics and behavior, communication and synchronization. Each of the groups captures the key features of the digital twin and improves the final quality of the system. The formulated groups of criteria will provide a unified and understandable classification of existing and future developments, which will allow standardizing the construction of complex robotic systems that provide high accuracy and physical identity. An algorithm for the operation of a digital twin has been developed, combining the proposed principles and criteria, including interconnected models and components that display the state of the robot in real time with a forecast of up to 10 seconds. The algorithm discrepancy analysis unit compares the forecast with real data and, if necessary, starts calibration, forming a closed loop to increase accuracy.

Keywords: digital twin, robotics complex, principles, criteria, algorithm, physical model

For citation: Gladishev M. D. Development of principles and criteria for building a digital twin of a robotic complex. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics.* 2026;3:47-55. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2026-3-47-55>. EDN GPKLAS.

Введение

Цифровые двойники (ЦД) в последние годы становятся ключевым инструментом для отладки, оптимизации и предсказания поведения робототехнических комплексов (РТК) [1]. С помощью ЦД стало возможно обучение алгоритмов искусственного интеллекта, а также адаптация алгоритмов управления без повреждения физического оборудования и элементов конструкции самого РТК еще до изготовления. Существует ряд стандартов, которые формулируют концептуальные принципы, архитектурные рекомендации для систем на основе ЦД [2–4], при этом в таких стандартах отсутствуют детализированные и измеримые показатели или критерии, позволяющие однозначно определить, является ли рассматриваемая система полноценным ЦД. Часть разработчиков и заказчиков систем ЦД сталкиваются с проблемой оценки точности и адекватности созданной цифровой модели по отношению к физической.

В работе предлагаются этапы построения ЦД, а также принципы, на основе которых формулируются критерии, позволяющие оценивать степень соответствия ЦД физической системе. Принципы соответствия должны охватывать основные этапы построения ЦД, включающие в себя условия геометрической точности импортируемой 3D-модели системы с сохранением геометрии и иерархии, и пропускную способность для системы синхронизации. На основе выдвигаемых принципов сформулирована система критериев, определяющая предельные ограничения как на допустимые погрешности в размерах, так и на соответствие самого программного обеспечения, используемого в качестве основы для всей разработки. Предложенный подход может служить для оценки технологической стадии и служить отправной точкой для введения единых стандартов в отрасли цифрового моделирования.

Принципы соответствия цифрового двойника физическому объекту

При разработке ЦД необходимо учитывать, будет ли использоваться эта технология для отладки SLAM (Simultaneous Localization and Mapping, одновременная локализация и построение карты) алгоритмов, настройки и обучения алгоритмов с ис-

кусственным интеллектом или необходимо провести виртуальную отладку программ и алгоритмов работы. Рассмотрим этапы построения системы:

Этап 1. Интеграция 3D-моделей из CAD (Computer-Aided Design) / Система автоматизированного проектирования (САПР) программ. При этом важно сохранить иерархию/структуру, все привязки, свойства материалов, центры масс, а также заготовить визуальную (видимая геометрия) и коллизионную геометрию (ограничивающая геометрия, отвечающая за столкновения). Иногда визуальная и коллизионные геометрии отличаются, и это необходимо учитывать в зависимости от среды разработки.

Этап 2. Визуализация. Если ЦД планируется работать на базе ROS (Robot Operating System, операционная система для роботов), то необходимо описать «скелет» робота, используя Unified Robot Description Format (URDF) – единый формат описания роботов. В данном формате структура робота представляет из себя древовидную структуру с указанием жестких тел и суставов – подвижных мест соединений. URDF хранит данные геометрии, кинематику, инерцию, привязки и др. На данном этапе задаются условия, по которым будущая система формирует список мест крепления колес, размещение датчиков, исполнительных устройств и пр. Указываются смещения для датчиков и другие базовые условия для стартовой настройки системы. На этом шаге у 3D-модели появляется согласованная геометрия с указанием координат системы и подвижных элементов.

Этап 3. Работа со средой разработки, выстраивание сцены, где происходит отладка работы робота. В качестве подобной среды может быть выбрана универсальная среда разработки: Gazebo, Unity, UnrealEngine и др. Среда разработки позволяет использовать инструментарий для работы с физикой, визуализацией, окружением, добавляет инструментарий для разработки, отладки процессов, интегрируя все элементы системы ЦД. На этом же этапе идет математическое описание всех элементов, модулей и подсистем. Для этого чаще всего используют Matlab/Simulink или аналогичные программы, позволяющие точно и просто описать математический модуль с дальнейшей его интеграцией.

Этап 4. Интеграция алгоритмов управления, под-

ключение модулей и выстраивание программной архитектуры [5]. На данном этапе идет процесс наращивания функционала ЦД, который в дальнейшем будет отлаживаться и сопрягаться с физическим роботом либо работать исключительно самостоятельно. Алгоритмы интегрируются с машинным обучением, системами технического зрения, SLAM и др. Среда разработки наполняется отдельными модулями и библиотеками, позволяя в будущем проводить отладку алгоритмов внутри себя. На данном шаге система работает как виртуальный робот + алгоритм работы, позволяя проводить имитацию поведения будущей физической системы в условиях, максимально приближенных к реальным.

Этап 5. Синхронизация с физическим роботом. Обязательное условие – наличие двусторонней/обратной связи. Реальный робот в режиме реального времени отправляет ЦД свои телеметрические данные, получая команды управления, рассчитанные как в виртуальной, так и в физической среде под данного робота с учетом его конструктивных и иных особенностей. Обмен данными может быть как беспроводным (Wi-Fi, Bluetooth, радио и др.), так и по проводу (USB, Ethernet и др.).

При разработке ЦД необходимо соблюдение принципов универсальности и проверяемости [6, 7]. Для каждого из описанного выше этапов предлагается система принципов, которая формализовала требования к точности, корректности и функциональности системы [8]. Предлагаемые принципы имеют обобщенный характер, позволяя применять их вне зависимости от среды разработки или используемых инструментов. Принципы позволяют сформулировать измерительные метрики. Каждый из принципов конкретизирует определенный этап.

Принцип 1 (П1) о геометрической точности. Создание модели ЦД начинается с описания геометрии РТК и окружающей среды – полигона. Основное требование в рамках П1 можно сформулировать так: геометрия цифровой модели должна совпадать с геометрией физической модели (ФМ). П1 задает среднее отклонение для ключевых точек трехмерной модели от характерного размера робота. Для особо чувствительных узлов, таких как датчики или исполнительные устройства, вводится локальный порог, что позволяет масштабировать требования как для малых, так и больших робототехнических платформ, обеспечивая сопоставимость физической и цифровой модели роботов:

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N p_{\text{ц}}^k - p_{\text{физ}}^k \leq \alpha L_{\text{ref}},$$

где $N \geq 12$ – количество контрольных замеряемых точек; k – индекс контрольной точки; $p_{\text{ц}}^k = [x_{\text{ц}}^k, y_{\text{ц}}^k, z_{\text{ц}}^k]^T$ – координаты k -й контрольной замеряемой точки в ЦД; $p_{\text{физ}}^k = [x_{\text{физ}}^k, y_{\text{физ}}^k, z_{\text{физ}}^k]^T$ –

координаты k -й (той же самой) контрольной замеряемой точки в ФМ; $L_{\text{ref}} = \max(x_{\text{физ}}^k, y_{\text{физ}}^k, z_{\text{физ}}^k)$ – действительный размер ФМ; $\alpha = 0,01$ – относительная точность (1 %). В свою очередь, для датчиков и исполнительных устройств локальная погрешность может выражаться как

$$\forall k \in K_{\text{дат}} \rightarrow |p_{\text{ц}}^k - p_{\text{физ}}^k| \leq \varepsilon_{\text{лок}} = 2 \cdot 10^{-3},$$

где $K_{\text{дат}}$ – множество индексов датчика; $\varepsilon_{\text{лок}}$ – локальный порог для датчиков. В данном случае идет проверка каждого датчика и модуля, что требует высокой точности по множеству контрольных точек. Установлено, что пороговое отклонение может быть не больше 2 мм.

Принцип 2 (П2) о кинематической точности контролирует корректность построения модели ЦД. Каждое звено РТК (платформа, колесо, рабочий инструмент и др.) должно иметь правильно заданную трансформацию и масштаб относительно родительского звена, а также ось вращения должна проходить через центр тяжести/геометрии модели. Выдвигаемый принцип необходим деталям и элементам, имеющим форму цилиндра или иную форму тела вращения. В телах вращения ось и центр тяжести/геометрии часто не совпадают, что напрямую влияет на работоспособность системы. Допускается угловое расхождение не более 1° , что обеспечивает кинематическое согласование:

$$TF_{k,l} \in F_{\text{доп}}, |\Delta\theta_{kl}| \leq \varepsilon_\theta = 1^\circ = \frac{\pi}{180} \text{ рад},$$

где $TF_{k,l}$ – матрица однородной трансформации 4×4 , связывающая положение родительского элемента с зависимым от него, состоит из матрицы поворота 3×3 и вектора перемещения 3×1 , где $k, l = \overline{1, 4}$; $F_{\text{доп}}$ – принадлежность допустимому множеству трансформаций; $\theta_{kl} = [\theta_x, \theta_y, \theta_z]$ – углы поворота между осями родительского и дочернего фреймов; $|\Delta\theta_{kl}|$ – вектор ошибки, берется как разность заданных углов, измеренных на физическом прототипе и цифровой модели; $\varepsilon_\theta = 1^\circ$ – абсолютный порог точности. Формула (1) показывает, что все трехмерные элементы, входящие в состав комплекса, имеют правостороннюю систему координат, что обеспечивает корректность размещения элементов еще на стадии подготовки $TF_{k,l} \in F_{\text{доп}}$.

Принцип 3 (П3) о динамической идентичности замкнутого цикла контролирует корректное взаимодействие физической симуляции и алгоритмов управления как при цифровой, так и при физической симуляции, а также обеспечивает идентичность выполнения базовых команд и позволяет синхронизировать как цифровой объект, так и физический. П3 гарантирует одновременную провер-

ку окружающей среды – физику взаимодействия с окружением и объектами, а также программную архитектуру, отвечающую за управление объектом. Такой подход гарантирует выполнение ЦД условий, идентичных физическому объекту:

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, M\}, M \geq 4, \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |x_{\text{цд}}^k - x_{\text{физ}}^k|^2} \leq \varepsilon_x,$$

где i – индекс действия; M – всего действий, в количестве ≥ 4 ; n – точки i -го действия; $x_{\text{цд}}^k$ – состояние системы по итогу выполненного действия для ЦД; $x_{\text{физ}}^k$ – состояние системы по итогу выполненного действия для ФМ.

Логика ПЗ: для всех действий (больше 4 совершаемых действий подряд) ошибка ЦД и ФМ должна быть меньше идеального/пороговой величины. Робототехнический комплекс или описываемая система имеют точку старта для выполнения некой последовательности действий. Старт происходит из состояния нулевой скорости, и должен выполняться строгий цикл действий, включающий не менее 4 простых действий/операций, которые возвращают систему в точку старта. Погрешность возврата, выражаемая в виде измеряемых критериев системы (времени, затрачиваемой мощности, ошибки в состоянии относительно точки «старт»), будет считаться итоговым состоянием системы по выбранному критерию оценки, который далее сравнивается с рассчитанной или полученной из статистики величиной. Далее происходит сравнение и выносятся

$$\forall i \in \{1, \dots, M\}: x_{\text{цд}}^k - x_{\text{фм}}^k \leq \varepsilon \Delta \text{ при } V_{\text{кан}} \geq V_{\text{мин}}, \Delta t \leq \Delta t_{\text{max}},$$

где $x_{\text{цд}}^k$ и $x_{\text{фм}}^k$ – состояние систем (цифровой и физической) после выполнения i -го действия при соблюдении ПЗ; $\varepsilon \Delta$ – допустимый порог расхождения состояний.

При соблюдении П4 подбирается такой режим обмена данными, при котором канал связи успешно передает весь поток данных в соответствии с ПЗ. При таком режиме работы система не работает слишком медленно или слишком быстро и достигается оптимальный баланс.

Предложенные принципы соответствия П1–П4 для ЦД задают систему требований от геометрического соответствия до синхронизации состояний при оптимальной скорости. Каждый принцип формализует ключевую особенность цифровой системы и может выражаться через измеряемые пороговые значения, что позволяет оценить готовность системы и сделать вывод о том, является ли рассматриваемая система ЦД. Для стандартизации ЦД, а также определения зрелости системы необходимо перейти от принципов к требованиям и критериям, которые позволили бы оценить соответствие ЦД существующим стандартам.

решение о дополнительной калибровке или продолжении работы с текущими параметрами систем.

Принцип 4 (ПЗ) о согласованной скорости обмена и синхронизации состояний. При рассмотрении системы ЦД одним из основных условий является наличие качественного канала связи между физической и цифровой системой. П4 гарантирует такую скорость передачи данных, при которой ЦД и ФМ обеспечат неоднократное выполнение действий, указанных в ПЗ, без нарушения динамической идентичности, при этом пропускная способность канала будет достаточной для одновременной передачи телеметрии, управляющих воздействий и пр. Пропускная способность канала связи устанавливается индивидуально под каждую систему с условием ее достаточности как для передачи минимального набора данных, так и не слишком избыточна для лишней нагрузки на систему.

Пусть для цикла M задан минимально требуемый поток данных $V_{\text{мин}}$ (байт/с), включающий телеметрию, команды управления и др., также задана максимально допустимая задержка Δt_{max} , обеспечивающая выполнение ПЗ. Тогда требования к каналу связи можно записать как

$$V_{\text{кан}} \geq V_{\text{мин}}, \Delta t \leq \Delta t_{\text{max}},$$

где $V_{\text{кан}}$ – фактическая пропускная способность канала связи; Δt – фактическая средняя задержка при обмене данными. П4 о согласованности состояний с учетом условий динамической идентичности можно сформулировать как

Критерии для оценивания цифрового двойника

Стандарты [2–4] формулируют общую терминологию, принципы, архитектуру и при этом практически не содержат детализированно измеряемых критериев соответствия ЦД. Разработчикам и заказчикам важно четко понимать, каким образом совокупность различных параметров и показателей позволяет рассматривать ту или иную систему в качестве полноценного ЦД, а не набора отдельных, не связанных между собой модулей и сервисов.

Предлагается решить данную задачу введением системы критериев, позволяющих унифицировать проверку для таких случаев. Критерии сформулированы в виде требований и могут быть применены к самым различным системам, начиная от любительских проектов, связанных с мобильной робототехникой, заканчивая ЦД производственных участков. Рассматривая систему ЦД, важно представлять ее как взаимосвязь физического объекта с цифровым в единой среде.

Для упрощения и систематизации требований предлагается их разделение на 3 следующие категории: критерии геометрии и кинематики; критерии динамики и поведения; критерии связи и син-

хронизации. Каждую группу нужно рассматривать как совокупность измеряемых требований, которые можно задать в виде пороговых значений, показателей или стадий. Сформулированные требования можно рассматривать в качестве базовых правил, на основе которых будет выстраиваться ЦД. Подобный подход позволит связать концептуальные и неявно выраженные требования существующих стандартов с практической проверкой конкретных решений.

Критерии геометрии и кинематики (К1) определяют, насколько корректно и полно цифровая модель (ЦМ) описывает геометрию, а также параметры физической системы [9–11]. Предъявляемые требования:

1. ЦМ описываемого объекта должна обеспечивать геометрическое соответствие физического объекта по набору контрольных точек и номинальному размеру.

2. Среднее отклонение координат контрольных точек для ЦМ от соответствующих координат физического объекта не должно превышать установленной погрешности:

– для общей геометрии объекта погрешность вычисляется от доли размера объекта (длины/ширины/высоты/диагонали и др. (устанавливается индивидуально));

– для положения датчиков, исполнительных устройств и других модулей, требующих повышенной точности, погрешность устанавливается относительно ближайших конструктивных элементов (от угла/поверхности/ребра и др.).

3. Максимально допустимые отклонения должны устанавливаться в проектной документации с учетом требования безопасности, точности управления и особенности отрасли.

4. Цифровая модель должна содержать в себе описанное и законченное представление системы и ее параметров (массы, инерции, жесткости, кинематики и пр.).

5. Доля физически существующих элементов, отраженных в цифровой рабочей модели и участвующих в физических расчетах, не должна быть менее установленного порога, исходя из проектной документации (рекомендуемое значение – не менее 90 %, исходя из обоснованных допущений, связанных с особенностями построения описываемой системы).

6. Доля физически существующих элементов, не отраженных в цифровой модели, должна быть не более установленного порога в проектной документации (рекомендуемое значение – не более 10 %, исходя из обоснованных допущений, связанных с особенностями построения описываемой системы).

Критерии динамики и поведения (К2) описывают реакцию ЦМ на воздействие и соответствие ее ФМ при различных сценариях эксплуатации:

1. Все трехмерные компоненты и узлы ЦМ (звенья, кинематические пары, сборочные единицы, исполнительные механизмы и др.):

– должны быть описаны в правосторонней системе координат с началом локальной системы координат в геометрическом центре / центре масс за исключением обоснованных случаев, связанных с особенностями построения описываемой системы;

– должны иметь строгую иерархию построения в зависимости от принадлежности и привязанности.

2. ЦМ должна иметь корректное описание кинематической структуры системы в виде взаимосвязанных наборов звеньев, кинематических пар, сборочных единиц, исполнительных механизмов и пр., связь между которыми обеспечивает линейный/вращательный/жестко связанный или другой тип связи, задающий диапазон вращения/перемещения/ограничения связанных между собой компонентов.

3. Оси вращения и направления перемещения, а также жесткие связи должны совпадать с фактическими осями и направлениями движения/ограничения ФМ в пределах устанавливаемого углового допуска, указанного в проектной документации и исходя из обоснованных допущений, связанных с особенностями построения описываемой системы.

4. Центры вращения и точки приложения перемещений в ЦМ должны соответствовать ФМ с точностью не более устанавливаемого линейного допуска, указанного в проектной документации и исходя из обоснованных допущений, связанных с особенностями построения описываемой системы.

5. Для каждой кинематической пары должны задаваться:

– допустимый диапазон углов/область перемещения;

– предельные скорости/ускорения;

– ограничения по зазорам и люфтам (опционально, в виде параметров, зависящих от характеристик узла температуры/материалов/ресурса работы и др.).

Критерии связи и синхронизации (К3) описывают требования к обмену данными [12], синхронизации состояний и обеспечению целостности процедуры обмена данными между ЦД и ФМ:

1. Физическая и цифровая модели должны быть согласованы таким образом, чтобы траектория движения звеньев/кинематических пар/сборочных единиц/исполнительных механизмов и пр. не приводила к ошибочным самопересечениям/пересечению с окружающей средой/объектами или нарушению установленных геометрических параметров.

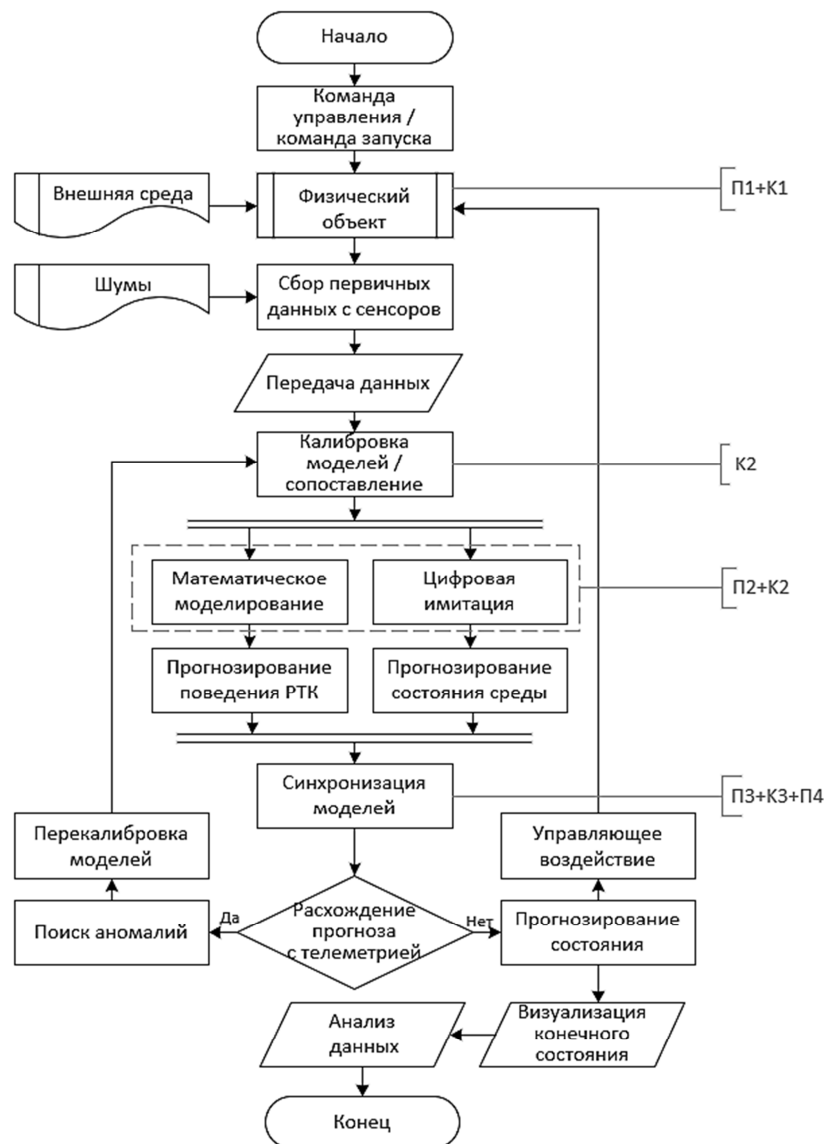
2. Для типового набора кинематических состояний (нулевое положение/конечное положение/рабочее положение и пр.) цифровой модели, связанной с физической системой, должны быть проведены проверки состояний на наличие/отсутствие ошибочных пересечений для определения соответствия цифровой системы физической с дальнейшей фиксацией процедуры как инструмента верификации цифровой системы в целом.

3. Структура геометрической и кинематической модели ЦД должна быть построена с допуском на возможность изменения уровня детализации системы без нарушения кинематических связей и геометрических согласований.

При переходе между уровнями детализации ЦД должен обеспечивать сохранение ключевых кинематических и геометрических параметров системы, влияющих на управляемость, безопасность, корректность отображения и пр. В проектной документации, относящейся к описываемой системе, состоящей из ФМ и ЦМ, образующих ЦД, должен быть определен минимально допустимый уровень, при котором описываемая система сохраняет статус ЦД для решаемого перечня задач.

Алгоритм работы цифрового двойника робототехнического комплекса на основе разработанных принципов и критериев

Структура ЦД представляет собой совокупность взаимосвязанных моделей [13], а также ряд программных компонентов, обеспечивающих отображение состояния физического робота в виртуальном пространстве с возможностью прогнозирования его состояния и положения в ближайшем будущем. Такой подход позволяет не только достоверно отображать текущее состояние физического робота [14], но и предвидеть траекторию движения и минимизировать возможные риски. Алгоритм работы системы на основе принципов П1–П4 и критериев К1–К3 представлен на рис.



Блок-схема алгоритма ЦД создаваемой системы

A block diagram of the data center algorithm of the system being created

Блок «Внешняя среда» моделирует факторы, воздействующие на движение робота, а также показания его сенсоров: типы поверхностей/грунтов, неровности, препятствия, изменяющееся магнитное поле, вибрация, температура и пр. Блок «Шумы» имитирует возможные помехи, ошибки, неточности измерений, возникающие при работе сенсоров РТК. В качестве основной среды разработки была выбрана среда Unity, включающая в себя большое количество модулей и библиотек, различные надстройки и скрипты управления, написанные на C#. Для математического моделирования был выбран MatLab Simulink, позволяющий промоделировать любой датчик или модуль, входящий в состав робота.

В цифровой модели факторы окружающей среды будут учитываться по-разному: для математической модели в Simulink – добавочные коэффициенты, дополнительные силы, моменты и пр.; для цифровой имитации в Unity – через коллизию с предметами, дополнительное окружение и надстройки к самой сцене. Блок «Математическое моделирование» включает в себя совокупность взаимосвязанных подмоделей: кинематическую модель – связь между угловой скоростью поворотов колес и угловой скоростью робота в плоскости движения; динамическую модель – уравнения движения, учитывающие массу, инерцию, трение, а также уклоны, взаимодействия с препятствиями и пр.; модели сенсоров – преобразования реальных физических величин в сигналы, получаемые от датчиков, добавочные шумы и ограничения.

Блок «Цифровая имитация» отвечает за визуализацию робота – его 3D-модели в среде Unity в режиме реального времени; отображение цифрового полигона испытаний, на котором располагаются препятствия, имитируются шумы и проходят сами заезды; отрисовку траектории движения робота для последующего наложения и сравнения с целью выявления зон ошибок; сбор, хранение, отправку телеметрии с цифрового робота. Сама цифровая имитация не будет выполнять расчетов динамического состояния – эти данные приходят из Simulink, – но при этом позволит проводить прогнозирование состояния и отображение реального положения робота.

Блок «Прогнозирование» использует результаты математического моделирования и состояние робота в реальном времени для вычисления будущего положения, ориентации и других параметров в недалеком временном горизонте – до 10 с (в перспективе возможно на более длинный интервал времени). В перспективе блок сможет предсказывать состояние физического робота в реальном времени, выполняя вычисления на основе актуальных данных телеметрии. Если набран большой массив данных без физического робота, система сама сможет предсказывать конечное состояние РТК.

Блок «Синхронизации моделей» объединяет результаты математического моделирования, цифровой имитации и прогнозирования состояния РТК и внешней среды в единое и согласованное представление. Среди наиболее важных задач для данного блока следует выделить приведение всех отдельных подсистем с разными временными метками к единой и согласование различных частот с приведением к единой, формирование целостного состояния робота для дальнейшей передачи в блок анализа и расхождения.

Представленные блоки дополняют систему, делая ее оптимальной для данной системы с ЦД РТК. Каждый блок интегрируется в общую схему ЦД таким образом, что получается единая система, учитывающая многие факторы и особенности. Физический робот через сбор всех данных с датчиков и сенсоров на Arduino формирует поток данных, который после обработки поступает в блок калибровки/сопоставления, где с помощью математических моделей и синхронизации с цифровым роботом уточняется текущее состояние. Далее расчет происходит в Simulink, позволяя вычислить текущее и будущее состояние на основе реального массива данных и затем это визуализировать в Unity. Блок анализа расхождений сравнивает прогноз с реальными данными и в случае необходимости говорит о необходимости калибровки, после чего модель снова готова к работе. Таким образом, в системе достигается замкнутый контур, повышающий точность всей системы.

Заключение

В результате выполнения работы решена задача по формализации требований, предъявляемых к ЦД РТК, обеспечивающих его идентичность и полное соответствие физическому объекту. Сформулированы и обоснованы 4 принципа, определяющие этапы выстраивания системы с ЦД, а также сформулированы 3 критерия, позволяющие сформировать требования к системам, включающим ЦД. Сформулированные принципы включают неравенства, позволяющие задать базовые условия измерения ЦД. Эта величина может быть выражена во времени, размерах, измеримых параметрах самой среды разработки. На основе предложенных принципов разработана система критериев, разделенная по группам: критерии геометрии и кинематики, критерии динамики и поведения, критерии связи и синхронизации. Критерии К1–К3 позволяют количественно оценить степень зрелости ЦД, а также дополняют уже существующие стандарты, объединяя общие концепции и архитектуру. Практическая ценность работы заключается в том, что описанные принципы и критерии могут быть использованы при разработке, отладке и сертификации ЦД РТК.

Список источников

1. Surender S. Digital Twins Market Size: Comprehensive Growth Analysis 2024. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/blog/SE/digital-twins-market-size-comprehensive-growth-analysis-2024/> (дата обращения: 11.02.2026).
2. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. 16 с.
3. SO/IEC 30173:2023. Digital twin – Concepts and terminology. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/104883/9f5ef872f1494df5a052a11a1bd291b6/ISO-IEC-30173-2023.pdf> (дата обращения: 11.02.2026).
4. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 1: Overview and general principles. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/75066/29271dec129c4c1c9569f961bfa4963d/ISO-23247-1-2021.pdf> (дата обращения: 11.02.2026).
5. Tao F., Cheng J., Qi Q., Zhang M., Zhang H., Sui F. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. V. 94. N. 9–12. P. 3563–3576. DOI 10.1007/s00170-017-0233-1.
6. Гладышев М. Д. Разработка модели цифрового двойника: технологические аспекты и практические применения // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер.: Естественные и технические науки. 2024. № 6. С. 48–51.
7. Kinzhalieva A. R., Khanova A. A., Bondareva I. O., Protalinskiy O. M. Digital twin of the management process of field service teams of an electric grid company // Journal of Physics: Conference Series “10th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences, IC-MSQUARE 2021”. 2021. V. 2090 (1). P. 012015. DOI 10.1088/1742-6596/2090/1/012015.
8. Боровков А. И., Рябов Ю. А. и др. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: моногр. / под ред. А. И. Боровкова. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. 492 с.
9. Zhu M., Yan Q., Wei W., Liu C., Wang M., Meng Q., Liu J., Li P., Li D., Peng Q. Simulation on Vertical Displacement and Vertical Force Distribution of Snow Under Tracked Vehicle // In Proceedings of China SAE Congress 2023: Selected Papers. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2024. P. 1493–1504. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0252-7_103.
10. Jang G., Lee S., Lee K. J. Discrete element method for the characterization of soil properties in Plate-Sinkage tests // J. Mech. Sci. Technol. 2016. V. 30. P. 2743–2751. DOI 10.1007/s12206-016-0536-4.
11. Liu W. K., Li S., Park H. S. Eighty Years of the Finite Element Method: Birth, Evolution, and Future // Arch. Computat. Methods Eng. 2022. V. 29. P. 4431–4453. DOI 10.1007/s11831-022-09740-9.
12. Khan K., Samuilik I., Ali A. A Mathematical Model for Dynamic Electric Vehicles: Analysis and Optimization // Mathematics. 2024. V. 12 (2). P. 224. DOI 10.3390/math12020224.
13. Chancharoen R., Chaiprabha K., Wuttisittikulkij L., Asdornwiset W., Saadi M., Phanomchoeng G. Digital Twin for a Collaborative Painting Robot // Sensors (Basel). 2022. V. 23 (1). P. 17. DOI 10.3390/s23010017.
14. Xuan D. T., Huynh T. V., Hung N. T., Thang V. T. Applying Digital Twin and Multi-Adaptive Genetic Algorithms in Human–Robot Cooperative Assembly Optimization // Appl. Sci. 2023. V. 13. P. 4229.

References

1. Surender S. Digital Twins Market Size: Comprehensive Growth Analysis 2024. Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/blog/SE/digital-twins-market-size-comprehensive-growth-analysis-2024/> (accessed: 11.02.2026).
2. GOST IEC 57700.37-2021. Komp'yuternye modeli i modelirovanie. Cifrovye dvojniki izdelij. Obshchie polozheniya [ISS IEC 57700.37-2021. Computer models and modeling. Digital counterparts of products. General provisions]. Moscow, Ros. in-t standartizacii, 2021. 16 p.
3. SO/IEC 30173:2023. Digital twin – Concepts and terminology. Available at: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/104883/9f5ef872f1494df5a052a11a1bd291b6/ISO-IEC-30173-2023.pdf> (accessed: 11.02.2026).
4. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 1: Overview and general principles. Available at: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/75066/29271dec129c4c1c9569f961bfa4963d/ISO-23247-1-2021.pdf> (accessed: 11.02.2026).
5. Tao F., Cheng J., Qi Q., Zhang M., Zhang H., Sui F. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, vol. 94, no. 9-12, pp. 3563-3576. DOI 10.1007/s00170-017-0233-1.
6. Gladyshev M. D. Razrabotka modeli cifrovogo dvojnika: tekhnologicheskie aspekty i prakticheskie primeneniya [Development of a digital twin model: technological aspects and practical applications]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2024, no. 6, pp. 48-51.
7. Kinzhalieva A. R., Khanova A. A., Bondareva I. O., Protalinskiy O. M. Digital twin of the management process of field service teams of an electric grid company. *Journal of Physics: Conference Series “10th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences, IC-MSQUARE 2021”*, 2021, vol. 2090 (1), p. 012015. DOI 10.1088/1742-6596/2090/1/012015.
8. Borovkov A. I., Ryabov Yu. A. i dr. Cifrovye dvojniki v vysokotekhnologichnoy promyshlennosti: monografiya [Digital twins in the high-tech industry: a monograph]. Pod redakciej A. I. Borovkova. Saint Petersburg, POLITEKH-PRESS, 2022. 492 p.
9. Zhu M., Yan Q., Wei W., Liu C., Wang M., Meng Q., Liu J., Li P., Li D., Peng Q. Simulation on Vertical Displacement and Vertical Force Distribution of Snow Under Tracked Vehicle. *In Proceedings of China SAE Congress 2023: Selected Papers*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2024. Pp. 1493-1504. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0252-7_103.
10. Jang G., Lee S., Lee K. J. Discrete element method for the characterization of soil properties in Plate-Sinkage tests. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2016, vol. 30, pp. 2743-2751. DOI 10.1007/s12206-016-0536-4.

11. Liu W. K., Li S., Park H. S. Eighty Years of the Finite Element Method: Birth, Evolution, and Future. *Arch. Computat. Methods Eng.*, 2022, vol. 29, pp. 4431-4453. DOI 10.1007/s11831-022-09740-9.

12. Khan K., Samuilik I., Ali A. A Mathematical Model for Dynamic Electric Vehicles: Analysis and Optimization. *Mathematics*, 2024, vol. 12 (2), p. 224. DOI 10.3390/math12020224.

13. Chanchaen R., Chaiprabha K., Wuttisittikulkij L., Asdornwised W., Saadi M., Phanomchoeng G. Digital Twin for a Collaborative Painting Robot. *Sensors (Basel)*, 2022, vol. 23 (1), p. 17. DOI 10.3390/s23010017.

14. Xuan D. T., Huynh T. V., Hung N. T., Thang V. T. Applying Digital Twin and Multi-Adaptive Genetic Algorithms in Human–Robot Cooperative Assembly Optimization. *Appl. Sci.*, 2023, vol. 13, p. 4229.

Статья поступила в редакцию 25.03.2026; одобрена после рецензирования 04.05.2026; принята к публикации 29.06.2026
The article was submitted 25.03.2026; approved after reviewing 04.05.2026; accepted for publication 29.06.2026

Информация об авторе / Information about the author

Михаил Дмитриевич Гладышев – соискатель кафедры информационных технологий; Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева; glad.mi@yandex.ru

Mihail D. Gladishev – Applicant of the Department of Information Technology; Astrakhan Tatishchev State University; glad.mi@yandex.ru

