

УДК 62-529

**Мешков Никита Сергеевич**, студент кафедры  
«Автоматизированных систем управления  
биотехнологическими процессами»  
Российский биотехнологический университет  
(РОСБИОТЕХ)

## **ОБЗОР ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ И СИМУЛЯТОРОВ ДЛЯ РОБОТОВ: ISAAC SIM/LAB VS GAZEBO (IGNITION) VS WEBOTS VS MUJOCO**

**Аннотация.** В статье рассмотрены цифровые двойники и симуляторы для робототехники: Isaac Sim/Isaac Lab, Gazebo, Webots и MuJoCo. Сравнены их физическая точность, визуализация, интеграция с ROS/ROS 2, поддержка обучения с подкреплением, производительность и лицензирование. Показаны сильные стороны каждой платформы и даны рекомендации по выбору.

**Ключевые слова:** Цифровые двойники; симуляторы для робототехники; Isaac Sim, Isaac Lab; Gazebo (Ignition); Webots; MuJoCo; интеграция с ROS 2.

В последние годы развитие робототехники неразрывно связано с совершенствованием виртуальных сред моделирования [3; 7]. Рост сложности автономных систем и необходимость их безопасного тестирования привели к активному внедрению технологий цифровых двойников и физических симуляторов [6; 10]. Такие инструменты позволяют проектировать, обучать и проверять поведение роботов в полностью контролируемых условиях без риска повреждения оборудования и с минимальными затратами времени и ресурсов [2; 8].

Цифровые двойники представляют собой виртуальные аналоги реальных объектов, способные воспроизводить их поведение на основе физических, механических и логических характеристик [7]. В робототехнике подобные модели служат связующим звеном между программным обеспечением, датчиками, исполнительными механизмами и реальной средой [8]. Симуляторы, в свою очередь, обеспечивают визуализацию, расчёт физики взаимодействий и интеграцию с системами управления [5; 9]. Благодаря этому разработчики могут проводить отладку алгоритмов навигации, планирования движений и взаимодействия с объектами без необходимости использовать реального робота [1; 4].

На сегодняшний день существует множество симуляторов, каждый из которых реализует собственный подход к моделированию физики и взаимодействию с искусственным интеллектом [5; 9]. Среди наиболее известных платформ выделяются Isaac Sim / Lab, Gazebo (Ignition), Webots и MuJoCo [3]. Они различаются по степени визуальной реалистичности, поддержке ROS, производительности, а также по направленности – от академических проектов до промышленного применения. Сравнение этих решений позволяет определить сильные и слабые стороны каждой платформы, а также выбрать оптимальный инструмент под конкретные задачи робототехнического проектирования [4; 6].

Цель данной статьи – провести обобщённый сравнительный анализ наиболее востребованных симуляторов для создания цифровых двойников роботов [7]. Основное внимание уделяется четырём платформам – Isaac Sim / Lab, Gazebo (Ignition), Webots и MuJoCo – как наиболее распространённым решениям, применяемым в современных научных и инженерных проектах [3; 5].

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: рассмотреть современные подходы к созданию цифровых двойников в контексте робототехнических систем [7]; провести сравнительный обзор четырёх симуляторов с точки зрения их архитектуры, функциональных возможностей и интеграции с ROS [5]; систематизировать ключевые характеристики платформ и выделить критерии их эффективности [6].

Объектом анализа выступают цифровые двойники и симуляционные платформы, используемые в области робототехники [8]. Предметом – особенности реализации и сравнительные преимущества конкретных симуляторов: Isaac Sim / Lab, Gazebo (Ignition), Webots и MuJoCo [3].



В ходе подготовки статьи применяются методы сравнительного анализа, систематизации информации из открытых источников и логического обобщения [7]. Подобный подход позволяет описать текущее состояние технологий и выявить тенденции их развития, определить перспективные направления интеграции цифровых двойников с обучением роботов на основе искусственного интеллекта [9].

В итоге статья направлена на формирование целостного представления о существующих инструментах симуляции, оценку их применимости в различных сценариях и выработку практических рекомендаций по выбору оптимальной платформы для исследовательских и инженерных задач [6; 10].

Современные подходы к созданию цифровых двойников для робототехники.

Цифровые двойники ускоряют проектирование, повышают качество разработки и снижают издержки, позволяя безопасно отрабатывать движение, восприятие, навигацию и взаимодействие роботов в контролируемой виртуальной среде [6; 7]. Это не просто трёхмерная модель, а экосистема, объединяющая физические параметры, программную логику, сенсорику и искусственный интеллект; она имитирует поведение реального робота с учётом массы, инерции, трения, деформаций и контактов, что даёт прогноз реакции оборудования и раннюю проверку контроллеров [8; 10].

Ключевой тренд – тесная связка симуляторов с ROS и ROS 2: модули управления отлаживаются в виртуальной среде и затем переносятся на реальные платформы, что особенно ценно при ограниченных ресурсах лабораторий [4; 5; 9]. Достоверность обеспечивают физические движки (PhysX, ODE, Bullet, DART, MuJoCo), каждый со своим балансом точности и производительности: от фокусировки на визуализации до математической строгости при моделировании многосвязных систем [2; 3].

Реалистичная графика важна не только для наглядности, но и для генерации синтетических датасетов компьютерного зрения (например, в Isaac Sim) [7; 9]. Быстро растёт применение обучения с подкреплением: в Isaac Lab и MuJoCo агенты осваивают сложные навыки без риска для оборудования, а близость физики облегчает перенос на реальные устройства [6; 9].

Широко востребованы мультиагентные сценарии: симуляторы должны синхронизировать вычисления, поддерживать сетевое взаимодействие и масштабирование; Gazebo (Ignition) активно используется для моделирования флотов автономных систем [3; 5]. Важна кастомизация миров и автоматизация экспериментов: варьируются освещение, материалы, препятствия; серии прогонов фиксируются в логах для анализа [2; 6].

Развитие идёт к облачным и распределённым решениям: Webots и Isaac Sim поддерживают удалённый доступ и совместную работу [7; 9]. Интеграция библиотек глубокого обучения (PyTorch, TensorFlow) открывает путь к адаптивным алгоритмам, корректирующим поведение в реальном времени [4; 10]. Для совместимости между экосистемами усиливается стандартизация форматов URDF, SDF и USD, обеспечивающих переносимость моделей [5; 6].

В результате цифровые двойники превращаются в комплексный инструмент на стыке физического моделирования, визуализации и искусственного интеллекта, охватывающий весь жизненный цикл робота – от проектирования до эксплуатации [7; 8]. Рост их возможностей укрепляет роль виртуальных испытаний в инженерной практике и формирует основу будущей цифровой инфраструктуры робототехники [9; 10].

Isaac Sim – часть экосистемы NVIDIA Omniverse и один из самых продвинутых инструментов для цифровых двойников и обучения ИИ [7; 9]. Платформа строится на PhysX, поддерживает формат USD и рендеринг с RTX и трассировкой лучей, что обеспечивает высокий уровень фотореализма и подходит для генерации синтетических датасетов компьютерного зрения [3; 6].

Ключевое преимущество – интеграция с ROS/ROS 2: тестируются навигация, SLAM и распознавание, а через ROS Bridge обеспечивается двусторонний обмен данными с



виртуальными датчиками и приводами [4; 5; 9]. Среда связана с ML-стеком (PyTorch, TensorFlow, Isaac Gym) и поддерживает параллельные симуляции для обучения с подкреплением [9; 10].

Isaac Lab – облегчённая версия для RL-экспериментов, использующая ту же физику и графику, но оптимизированная для массового запуска симуляций [7]. Это востребовано в исследовательских лабораториях при быстром тестировании гипотез [6].

Сильные стороны: реалистичная графика (RTX), физика на PhysX, тесная связь с Omniverse и ROS/ROS 2, API на Python и C++, поддержка мультипользовательских сцен и облачного запуска [9]. Платформа широко применяется в промышленной автоматизации и автономном транспорте [3; 10].

Ограничения: высокие требования к оборудованию (GPU RTX), сравнительно высокий порог входа (Python, ROS, 3D-пайплайн); тесная привязка к Omniverse может быть избыточной для небольших проектов [5]. С точки зрения физики реализованы трение, упругость, мягкие тела, а также готовые шаблоны роботов и сцен [6; 8]. Поддерживается совместная работа над сценами и облачное моделирование [7; 9].

Таким образом, Isaac Sim / Isaac Lab – мощное, но ресурсоёмкое решение, оптимальное для инженерных и научных задач, где требуются точная физика, фотореализм и интеграция с ИИ и RL [9; 10].

Gazebo (Ignition) – открытый симулятор, тесно интегрированный с ROS/ROS 2, давно применяемый в академических и инженерных проектах [5; 8]. Переход к Ignition привёл к модульной архитектуре: визуализация, физика, I/O и коммуникации разделены на независимые компоненты, что улучшило гибкость и интеграцию [3].

Поддерживаются несколько физических движков (ODE, DART, Bullet, Simbody), что позволяет выбирать баланс между точностью и скоростью [8]. Визуализация реализована на OGRE 2 с PBR, симулятор поддерживает камеры, лидары, ИК-сенсоры и GPS [5]. Связку с ROS/ROS 2 обеспечивают пакеты gazebo\_ros\_pkgs и ros\_gz, что позволяет отлаживать навигацию и планирование без реального оборудования [4; 5].

Формат SDF описывает сцены и модели, а плагины на C++/Python позволяют добавлять пользовательские контроллеры и датчики [8]. Проект распространяется бесплатно и поддерживается активным сообществом, предоставляющим готовые модели и примеры кода [1; 5]. Gazebo активно применяется в обучении и на соревнованиях RoboCup, DARPA SubT [3].

Преимущества: открытый код, модульность, поддержка ROS/ROS 2, мультиагентные сцены, высокая кастомизация [5; 8].

Недостатки: графика уступает RTX-рендеру, высокая нагрузка на CPU при больших сценах, трудности миграции со старых версий [6; 7].

В итоге Gazebo (Ignition) – надёжная универсальная платформа, ориентированная на функциональность и совместимость; оптимальна для прототипирования, обучения и тестирования алгоритмов управления, выступая стандартом де-факто в среде ROS [4; 5; 8].

Webots – открытая платформа Cyberbotics Ltd., ориентированная на образование и прикладные эксперименты [2; 8]. От учебного инструмента конца 1990-х годов среда выросла до гибкого симулятора с физикой, визуализацией и широкой библиотекой роботов [3; 9].

Главные свойства: простой графический редактор сцен, быстрая сборка миров, настройка материалов, света и камер – удобно для обучения и прототипирования [1; 5]. Физика на ODE обеспечивает реалистичные контакты, трение и упругость, достаточные для большинства академических сценариев [6]. Богатая библиотека моделей (колёсные платформы, манипуляторы, дроны, гуманоиды) расширяется через PROTO; поддерживаются C/C++/Python/Java/MATLAB, а также ROS/ROS 2 [4; 9].

Встроенные датчики – камеры, лидары, дальнометры, IMU, GPS – гибко настраиваются по частоте, диапазону и шумам [8]. С 2018 года код открыт по лицензии Apache 2.0, что упростило кастомизацию и сделало среду популярной в университетах, на курсах по мехатронике и соревнованиях вроде Eurobot и WRO [1; 5; 8].



Визуализация уступает фотореалистичным решениям, но достаточна для анализа поведения и генерации синтетических данных через API [7; 9]. Экосистема развивается: улучшена совместимость с ROS 2, добавлен экспорт URDF/USD для переноса моделей в Gazebo и Isaac Sim [6; 9].

Преимущества: простота и низкий порог входа; обширная библиотека моделей и датчиков; поддержка многих языков и ROS/ROS 2; открытый код и невысокие требования к оборудованию [1; 4; 5].

Недостатки: ограниченная точность ODE при сложных контактах, падение производительности в детализированных сценах, отсутствие нативного ядра RL, меньшая пригодность для крупных промышленных проектов [6; 7; 9].

Итог: Webots – доступная и универсальная среда для обучения, экспериментов и быстрой проверки идей; при умеренной физической точности обеспечивает стабильную работу даже на базовых компьютерах [2; 8; 9].

### 3. Сравнение платформ и выводы

Современные симуляторы робототехнических систем существенно различаются по архитектуре, уровню визуализации, физической точности и степени интеграции с системами управления. Несмотря на общую цель – моделирование поведения роботов в виртуальной среде, каждая платформа ориентирована на собственный класс задач и категорию пользователей. Для наглядного анализа ниже приведена сравнительная таблица 1, отражающая ключевые характеристики четырёх рассмотренных симуляторов.

Таблица 1

Сравнение симуляторов для цифровых двойников роботов

Параметр	Isaac Sim / Isaac Lab	Gazebo (Ignition)	Webots	MuJoCo
Разработчик	NVIDIA	Open Source Robotics Foundation	Cyberbotics Ltd.	DeepMind
Тип лицензии	Бесплатная (с ограничениями)	Открытая (Apache 2.0)	Открытая (Apache 2.0)	Открытая (Apache 2.0)
Основной физический движок	NVIDIA PhysX	ODE / DART / Bullet / Simbody	ODE	Собственный аналитический движок
Графическая реалистичность	Очень высокая (RTX, трассировка лучей)	Средняя (OGRE 2, PBR)	Умеренная	Низкая
Поддержка ROS / ROS 2	Полная	Полная	Частичная / Полная (через плагины)	Частичная (через API)
Интеграция с ИИ и ML	Глубокая (Isaac Lab, RL, синтетические данные)	Ограниченная	Возможна через Python / ROS	Полная (RL, DeepMind, OpenAI Gym)
Редактор сцен	Есть (Omniverse)	Да (Ignition GUI)	Да (графический редактор)	Нет (MJCF / XML)
Точность физики	Высокая	Средняя / высокая (в зависимости от движка)	Средняя	Очень высокая
Производительность	Зависит от GPU, требует RTX	Средняя, CPU-зависимая	Высокая на обычных ПК	Очень высокая
Фокус применения	Промышленность, обучение ИИ, автономные системы	Академическая и прикладная робототехника	Образование, учебные проекты	Машинное обучение, биомеханика



Продолжение таблицы 1

Параметр	Isaac Sim / Isaac Lab	Gazebo (Ignition)	Webots	MuJoCo
<b>Сложность освоения</b>	Высокая	Средняя	Низкая	Средняя / высокая
<b>Работа в облаке / удалённый доступ</b>	Поддерживается (Omniverse Cloud)	Возможна вручную	Частично (через Web-интерфейсы)	Возможна с внешними средствами
<b>Преимущества</b>	Реализм, AI-интеграция, синтетические данные	Открытость, ROS, мультиагентность	Простота, библиотека моделей, кроссплатформенность	Точность, скорость, RL-платформа
<b>Недостатки</b>	Требует мощных GPU, сложен в освоении	Средняя графика, несовместимость версий	Ограниченная физика, слабая графика	Нет графического интерфейса, требует знаний физики

В результате анализа можно выделить несколько групп платформ, отличающихся своей специализацией.

Isaac Sim / Isaac Lab представляет собой технологически продвинутую экосистему, ориентированную на промышленную и научную робототехнику. Основные преимущества – фотореалистичная графика, поддержка RTX, генерация синтетических датасетов и возможность обучения с подкреплением в интеграции с PyTorch и TensorFlow. Платформа идеально подходит для задач цифрового производства, автономных транспортных систем и роботизированных комплексов, где требуется высокая точность и интеграция с системами искусственного интеллекта. Однако высокая вычислительная нагрузка и зависимость от GPU делают Isaac Sim менее удобным для учебных целей.

Gazebo (Ignition) занимает центральное место среди открытых симуляторов. Его архитектура, ориентированная на модульность и интеграцию с ROS 2, делает платформу гибким инструментом для академических и прикладных разработок. Поддержка нескольких физических движков позволяет пользователю балансировать между скоростью и точностью. Gazebo также остаётся основным стандартом для учебных программ и соревнований по робототехнике. Главным ограничением является средний уровень графики и необходимость адаптации к новой архитектуре Ignition.

Webots ориентирован прежде всего на образование и быстрые прототипы. Простота интерфейса, готовые библиотеки роботов и датчиков, а также низкие системные требования делают его отличным выбором для студентов и преподавателей. Платформа обеспечивает базовую поддержку ROS и позволяет писать программы на популярных языках, включая Python и C++. Хотя точность физики уступает более продвинутым симуляторам, Webots остаётся незаменимым инструментом для обучения основам робототехники и программирования автономных систем.

MuJoCo, напротив, представляет собой высокоточный физический симулятор, востребованный в сфере машинного обучения и анализа динамики. Его архитектура ориентирована на эффективность, математическую строгость и предсказуемость результатов. Благодаря открытой лицензии и тесной связи с OpenAI Gym и DeepMind Control Suite, MuJoCo стал стандартом для обучения агентов в задачах управления. Недостаток визуальной составляющей компенсируется скоростью и детальностью моделирования, что делает его особенно ценным для разработчиков алгоритмов Reinforcement Learning.



## Заключение

В ходе сравнительного анализа можно отметить, что каждая из рассмотренных платформ реализует собственную стратегию развития цифровых двойников для робототехники.

Isaac Sim / Isaac Lab формирует направление, связанное с интеграцией симуляции, искусственного интеллекта и облачных вычислений. Этот симулятор становится инструментом будущего цифровых фабрик, где виртуальная среда не только имитирует, но и обучает реальные системы.

Gazebo (Ignition) продолжает удерживать позицию наиболее универсального решения для академической среды. Он сочетает открытость, модульность и гибкость, обеспечивая надёжную основу для разработчиков, использующих ROS 2. Именно Gazebo чаще всего служит стартовой площадкой для инженеров, переходящих от учебных моделей к промышленным проектам.

Webots выполняет функцию образовательной платформы, обеспечивающей быстрый вход в робототехнику. Простота интерфейса и доступность делают его идеальным для лабораторных занятий и курсов, где важно сосредоточиться на алгоритмах, а не на настройке среды.

MuJoCo демонстрирует иной подход – акцент на физической достоверности и машинном обучении. Этот симулятор обеспечивает уникальные возможности для отработки алгоритмов управления, анализа движений и обучения агентов с подкреплением. Его применение особенно эффективно там, где точность физики и стабильность моделирования важнее визуальной составляющей.

Анализ показывает, что универсального решения, одинаково подходящего для всех сценариев, не существует. Выбор конкретного симулятора зависит от задач:

для научных исследований и ИИ-разработок – Isaac Sim или MuJoCo;

для академического обучения и тестирования алгоритмов ROS – Gazebo (Ignition);

для образовательных программ и учебных проектов – Webots.

В результате можно заключить, что развитие цифровых двойников для робототехники идёт в сторону объединения трёх направлений: физической точности, визуальной реалистичности и интеграции с искусственным интеллектом. Эти тенденции формируют основу для появления гибридных симуляторов нового поколения, способных объединять вычислительные мощности GPU, облачные технологии и интеллектуальные алгоритмы обучения.

Постепенное сближение функциональных возможностей различных платформ приведёт к формированию единой экосистемы симуляции, где цифровые двойники станут неотъемлемой частью проектирования, обучения и эксплуатации роботов. Такой подход позволит ускорить разработку автономных систем, повысить надёжность их функционирования и сделать процесс создания интеллектуальных машин более доступным и предсказуемым

## Список литературы:

1. Безумнов Д. Н., Петухов В. М. (сост.) Основы мехатроники и робототехники: учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ для направлений 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 23.03.04 «Управление в технических системах». – Москва: МТУСИ, 2024. – 34 с.

2. Бжихатлов И. А. Моделирование робототехнических систем в программе V-REP: учебно-методическое пособие. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2018. – 59 с.

3. Глазунов В. А., Хейло С. В. Новые механизмы робототехнических и измерительных систем: монография. – Москва: Техносфера, 2022. – 244 с.

4. Джозеф Л. Изучение робототехники с помощью Python: практическое руководство / пер. с англ. – Москва: ДМК Пресс, 2019. – 250 с.



5. Лавренов Р. О., Магид Е. А. Основы ROS1 и ROS2: учебно-методическое пособие. – Казань: Казанский университет, 2024. – 43 с.
6. Макаров А. М., Малолетов А. В., Ветлицын М. Ю. Цифровые двойники изделий и технологических процессов: лабораторный практикум: учебное пособие. – Волгоград: ВолгГТУ, 2022. – 92 с.
7. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт: монография. – Москва: АльянсПринт, 2020. – 401 с.
8. Пшихопов В. Х., Медведев М. Ю., Костюков В. А., Гайдук А. Р., Федоренко Р. В., Гуренко Б. В., Крухмалев В. А., Медведева Т. Н. Проектирование роботов и робототехнических систем: учебное пособие. – Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2014. – 196 с.
9. Ху Ч., Ли Ц. ROS 2. Программирование интеллектуальных роботов. – Москва: ДМК Пресс, 2025. – 544 с.
10. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: монография / А.И. Боровков [и др.]; под ред. А. И. Боровкова. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2022. – 492 с.

