



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-43-53>

УДК 004.942, 519.876.5

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РОБОТОВ И ИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Т. Ю. КИМ, Г. А. ПРОКОПОВИЧ

*Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Разработана универсальная программная технология для быстрого создания и тестирования цифровых двойников робототехнических систем с возможностью адаптивного управления. Она позволяет гибко и относительно быстро создавать цифровые двойники мобильных и антропоморфных роботов. Цифровой двойник, состоящий из имитационных моделей кинематической системы, системы управления и среды функционирования, в режиме реального или псевдореального времени способен практически полностью имитировать поведение робота в различных режимах. Описан процесс работы технологии, начиная от создания твердотельной модели и заканчивая выбором метода оптимального управления движением робота. Особое внимание уделено адаптивному управлению через обучение с подкреплением, позволяющему системе адаптироваться в изменяющихся условиях. В зависимости от целей предполагаемого объекта и доступности исходных данных предлагаемая технология дает возможность проектировать и реализовывать систему управления роботом или проверять новые методы управления. Реализован практический пример применения технологии создания цифровых двойников для управления антропоморфным роботом, цель которого – имитация человеческой ходьбы. Результаты подтверждают сокращение времени разработки и повышение надежности решений. Технология интегрирована в единый программный комплекс, что упрощает создание новых двойников и тестирование алгоритмов.

Ключевые слова: мобильный робот, колесный робот, антропоморфный робот, цифровой двойник, система управления, генетический алгоритм, обучение с подкреплением, имитационное моделирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ким, Т. Ю. Технология создания цифровых двойников для оптимизации конструктивных параметров роботов и их систем управления / Т. Ю. Ким, Г. А. Прокопович // Цифровая трансформация. 2025. Т. 31, № 3. С. 43–53. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-43-53>.

TECHNOLOGY FOR CREATING DIGITAL TWINS TO OPTIMIZE THE DESIGN PARAMETERS OF ROBOTS AND THEIR CONTROL SYSTEMS

TATYANA YU. KIM, RYHOR A. PRAKOPOVICH

*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. A universal software technology for rapid creation and testing of digital twins of robotic systems with adaptive control capability has been developed. It allows for flexible and relatively rapid creation of digital twins of mobile and anthropomorphic robots. A digital twin consisting of simulation models of the kinematic system, control system, and operating environment is capable of almost completely simulating the robot's behavior in various modes in real or pseudo-real time. The technology operation process is described, starting from creating a solid model and ending with selecting the optimal robot motion control method. Particular attention is paid to adaptive control through reinforcement learning, which allows the system to adapt to changing conditions. Depending on the goals of the proposed object and the availability of initial data, the proposed technology makes it possible design and implement a robot control system or test new control methods. A practical example of applying the technology for creating digital twins to control an anthropomorphic robot aimed at simulating human walking has been implemented. The results confirm a reduction in development time and an increase

in the reliability of solutions. The technology is integrated into a single software package, which simplifies the creation of new twins and testing of algorithms.

Keywords: mobile robot, wheeled robot, anthropomorphic robot, digital twin, control system, genetic algorithm, reinforcement learning, simulation modeling.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Kim T. Yu., Prakaopovich R. A. (2025) Technology for Creating Digital Twins to Optimize the Design Parameters of Robots and Their Control Systems. *Digital Transformation*. 31 (3), 43–53. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-3-43-53> (in Russian).

Введение

С целью снижения финансовых затрат и рисков, связанных с проведением экспериментов на реальных объектах, в научных и производственных областях широко применяются цифровые двойники. Это дает возможность проводить исследования и анализ в виртуальной среде, минимизируя временные затраты, обеспечивая более быстрые циклы разработки [1]. Цифровой двойник – комплексная имитационная модель, точно воспроизводящая все физические характеристики и логику поведения за счет оснащения сенсорами и системой управления, что позволяет полноценно взаимодействовать с окружающей средой.

В ряде научно-технических работ авторами были созданы цифровые двойники мобильных роботов, а также разработаны методы оптимизации систем управления, нейросетевого регулирования и обучения с подкреплением для мобильных роботов и параллельных манипуляторов. Кроме того, с помощью эволюционных алгоритмов проводилась оптимизация массы компонентов редуктора для трехмерной печати [2–4]. На основе этих моделей успешно тестировались методы автоматической генерации траекторий для колесных роботов, что подтвердило их эффективность и универсальность. Одним из первых результатов стало создание имитационной модели двухколесного робота [5], которая получила дальнейшее развитие в формировании и совершенствовании системы управления [6].

Разработанная система обеспечила стабильное движение по заданной траектории и адаптацию к изменяющейся внешней среде. Для повышения точности управления использовались сенсоры и обратная связь. Также велись работы по оптимизации целевой функции, определяющей критерии эффективности системы через точность движения, минимизацию ошибок и устойчивость к внешним воздействиям [7, 8]. Для ее настройки применялись современные методы, такие как генетические алгоритмы и обучение с подкреплением. Первые позволяли находить оптимальные параметры управления, имитируя естественный отбор, тогда как второй подход обеспечивал самообучение системы в процессе взаимодействия со средой [4, 6–11].

Таким образом, накопленный опыт авторов позволил на основе разработанного шаблона создать и выполнить тестирование цифровых двойников различных роботов и устройств, что продемонстрировано в [2, 4, 11]. Так, в [4] представлена оптимизация массы компонентов редуктора для трехмерной печати с применением генетического алгоритма. В [2] описывалось создание антропоморфного робота, в [11] – автономное управление подъемной воздушной подушкой, причем обе работы основывались на применении обучения с подкреплением.

В результате анализа проделанной работы появилось логическое решение по объединению и унификации полученного опыта. Это позволило не только систематизировать информацию, но и создать единый программный комплекс, который в последующем мог бы интегрировать и другие модели и алгоритмы. Таким образом, предложенный программный комплекс можно считать реализацией целой технологии по созданию и анализу цифровых двойников. Основные функциональные блоки, из которых состоит рассматриваемая технология, представлены на рис. 1.

Предложенная технология базируется на общих подходах разработки имитационных моделей, спроектированных из твердотельных моделей, моделирования и модели системы управления, служит для обеспечения взаимодействия между блоками (моделями). Эта технология опирается на общие подходы кинематических и динамических расчетов роботов, а также на опыт авторов. Комбинирование вышеперечисленных моделей друг с другом позволяет экспериментировать и создавать новые цифровые двойники. К примеру, к модели антропоморфного робота можно добавить существующие сенсоры для обхода препятствий, или применить подражательный метод для выполнения человеческой походки модели робота, как это было реализовано на примере колесного робота в [5].

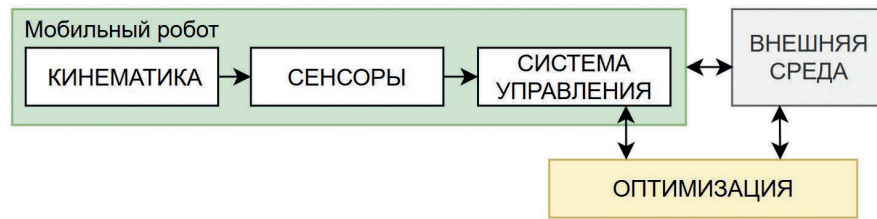


Рис. 1. Универсальная схема создания цифровых двойников
Fig. 1. Universal framework for digital twin development

Технология создания цифровых двойников

Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель реального робота или другого технического устройства, выполненную в одной или нескольких специализированных САх (Computer-aided technologies – автоматизированные системы проектирования и производства) системах, таких как CAD (проектирование), CAM (производство), CAE (инженерный анализ) [12]. В процессе исследований все работы проводились в среде MATLAB/Simulink.

Типовой цифровой двойник мобильного робота состоит из следующих компонентов:

- 1) имитационная модель объекта управления, повторяющая все физические параметры робота, которая создается на основе полной трехмерной модели робота (CAD);
- 2) модель его системы управления.

Имитационная модель может быть представлена в виде математического описания, демонстрируя зависимости и системы уравнений, либо в виде численной модели. Система управления может быть в виде некой аналоговой формы, либо численно воспроизводить исполнение заданных алгоритмов управления, например, контроллер. Причем в некоторых случаях имитационная модель системы управления может быть вынесена из цифрового двойника и заменена реальной системой управления. Тогда данную систему принято называть HIL (Hardware-in-the-loop). Она позволяет тестировать реальные контроллеры, взаимодействующие с имитационными моделями робототехнических систем, для проверки их работоспособности в условиях, приближенных к реальным.

Имитационная модель робота состоит из кинематической и динамической частей. Кинематическая модель описывает положение, скорость и ускорение робота, не принимая во внимание действующие на него силы и моменты. Кинематика фокусируется на геометрических движениях: изменение положения и угла поворота платформы. Динамическая модель робота, в свою очередь, учитывает внешние факторы, такие как силы, момент, инерция и трение. Динамическую модель можно создавать в Simulink самостоятельно из блоков в библиотеке самого Simulink или интегрировать уже имеющуюся твердотельную модель CAD, что позволит создать модель, которая учитывает физические ограничения и геометрические конструкции. При правильном описании кинематической модели среда MATLAB способна сгенерировать адекватную динамическую модель.

Следующим важным компонентом имитационной модели робота являются сенсоры, которые обеспечивают сбор информации из окружающей среды и его внутреннего состояния. Там уже реализованы фильтрация и нормализация получаемых данных, которые улучшают точность и надежность данных для управления и принятия решения. Следующий компонент – внешняя среда, также разрабатываемая в виртуальной среде. В работе по оптимизации контроллера движения мобильного робота [6] внешняя среда представляет собой полигоны с возможностью выбора карт. Имитационная модель может взаимодействовать с различными препятствиями или следовать по линии. Процесс взаимодействия имитационной модели робота с виртуальной средой анализируется на основе предложенных целевых функций, которые оценивают качество управления и выполнение поставленной задачи. Заключительным компонентом является процесс оптимизации, где непосредственно реализуется система управления. Оптимизация направлена на поиск наилучших параметров управления, удовлетворяющих заданным критериям эффективности. Для этого применяются современные методы, такие как генетические алгоритмы и обучение с подкреплением.

Подготовка исходных данных – важный этап при создании цифрового двойника, от которого зависит точность будущих расчетов. Эти данные служат фундаментом для последующего мо-

делирования и включают в себя информацию о положении и об ориентации реального робота, параметры исполненных механизмов, характеристики сенсоров и карт. Взаимодействие этих компонентов позволяет формировать различные варианты цифровых двойников, имеющие некоторые сходства между собой. Поэтому было принято решение объединить их в технологию создания цифровых двойников, которая включает различные имитационные модели и системы управления. В качестве практического примера в разделе «Практическое применение технологии создания цифрового двойника с возможностью адаптивного управления» представлена реализация имитационной модели и системы управления антропоморфного робота.

На рис. 2 показана функциональная схема технологии создания цифрового двойника.

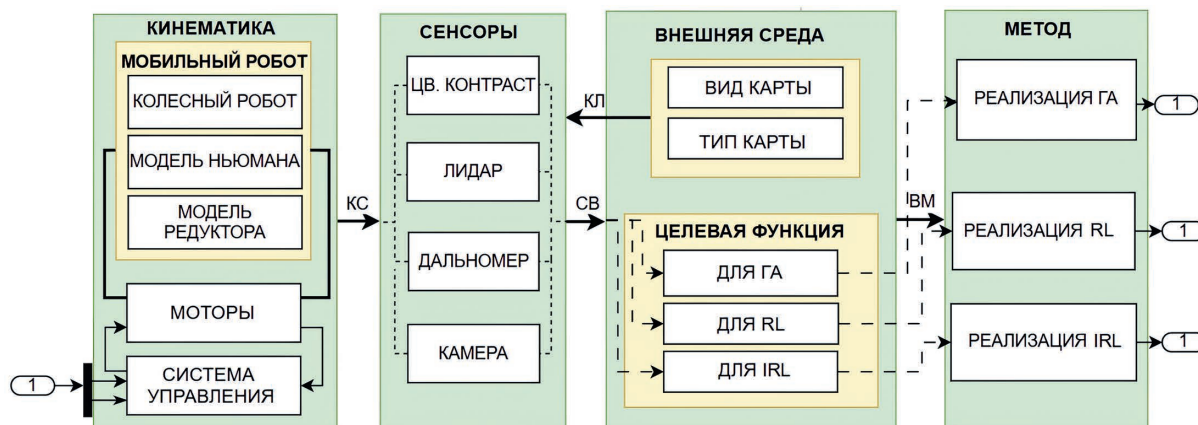


Рис 2. Функциональная схема технологии создания цифрового двойника

Fig. 2. Functional diagram of the digital twin creation technology

Рассмотрим подробнее связи между блоками. Сигнал КС (кинематика – сенсоры) передает данные, вводимые пользователем о характеристиках робота и выборе типа управления, из блока «Кинематика» в блок «Сенсоры». Сигнал СВ (сенсоры – внешняя среда) передает данные от сенсоров об окружающей среде и о состоянии робота в блок «Внешняя среда» для целевой функции, при этом данные уже проходят фильтрацию, нормализацию и интерпретацию. Сигнал КЛ (карта – лидар) передает информацию о внешней среде обратно в блок «Сенсоры» для корректировки данных; при этом данные преобразуются в оттенки серого и масштабируются в метры/пиксели. Сигнал ВМ (вознаграждение – методы) передает данные целевой функции и характеристики внешней среды в блок «Метод». Прямая линия на схеме означает соединение физических параметров робота, а пунктирная линия указывает предполагаемые связи между блоками. На рис. 2: ГА – генетический алгоритм; RL – обучение с подкреплением; IRL – подражательное обучение.

Как уже отмечалось, цифровой двойник состоит из кинематики робота, сенсоров и внешней среды, а также системы управления. Таким образом, получаем три имитационные модели, а именно: модель робота, модель сенсоров и модель внешней среды. Эти модели могут комбинироваться в различных конфигурациях для создания других роботов.

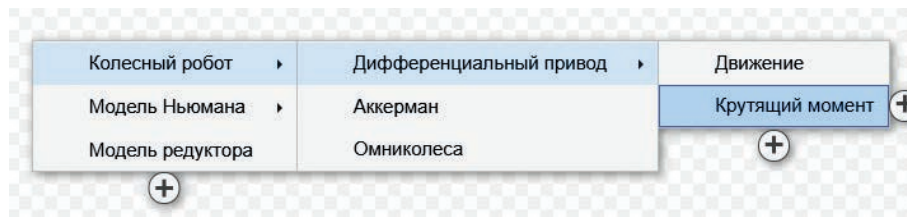
Основные разделы в многослойной модели

При запуске многослойной модели появляются четыре основных раздела: «Кинематика», «Сенсоры», «Внешняя среда», «Оптимизация». Каждый блок имеет свой набор параметров, от выбора которых зависят остальные параметры в последующих этапах.

«Кинематика». Здесь представлены такие модели, как дифференциальный привод с приводом Аккермана, омниколеса, модель компонентов редуктора для трехмерной печати и антропоморфный робот. Каждая из них позволяет осуществлять выбор подходящего типа двигателя в зависимости от конфигурации робота, а также его габаритов. В случае колесного робота можно задать необходимый тип двигателя и его параметры, такие как мощность, крутящий момент и скорость вращения. Для моделей шестерней возможно уточнение входных параметров, включая передаточное отношение, тип зацепления и материалы. Модель антропоморфного робота предоставляет возможность выбора отдельных компонентов, таких как манипулятор или педипулятор, либо

полного робота в заданной конфигурации, что адаптирует кинематическую модель под конкретные задачи. Каждая из представленных моделей сопровождается соответствующим описанием кинематической характеристики, обеспечивая возможность дальнейшего моделирования.

В разделе «Кинематика» необходимо выбрать объект управления в выпадающем окне, тип модели и вид управления (рис. 3, *a*) и задать начальные значения в зависимости от выбранного объекта (рис. 3, *b*).



a

Кинематика	
Выбор объекта Колесный робот Модель Ньюман. Модель редукто..	Ввод входных параметров лин. скорость v угл. скорость w рад. колеса R ширина базы b нач. положение [x y alpha]
Выбор модели ☒ мат. модель ☐ тверд. модель	

b

Рис. 3. Реализация блока «Кинематика»:

a – выбор объекта для блока (колесный робот с дифференциальным приводом); *b* – интерфейс блока

Fig. 3. Implementation of the “Kinematics” block:

a – selection of an object for the block (wheeled robot with differential drive); *b* – block interface

На выходе выбранной модели формируются данные, необходимые для дальнейшей обработки: скорости вращения колес, текущие координаты робота и угол ориентации. Эти данные можно представить в виде графиков, таблиц, а также сохранить в формате .mat.

«Сенсоры». В этом разделе (рис. 4, *a*) представлены различные типы датчиков, предназначенные для моделирования и обработки входных данных, имитирующих сигналы, поступающие с реальных устройств. В настоящее время доступны следующие датчики: датчик света, датчик расстояния, лидар, адаптированные для колесного робота. Выбор количества и расположения сенсоров показан визуалью на рис. 4, *b*. В соответствии с выбором сенсора заполняются необходимые входные параметры, остальные же игнорируются. Для модели антропоморфного робота предполагается использовать вышеперечисленные сенсоры в зависимости от поставленных задач, тогда как для редуктора нет необходимости использовать этот блок. В дальнейшем планируется расширение функционала за счет добавления камер, ультразвуковых датчиков, датчиков освещенности и GPS-модулей.

Управление робототехнической системой осуществляется исходя из информации, полученной с сенсоров, что позволяет адаптировать поведение робота под текущие условия окружающей среды. Рассмотрим пример использования сенсоров на мобильном роботе с датчиками света. Для начала пользователь задает их количество и расположение на корпусе мобильного робота в соответствии с поставленной задачей. Внутри каждого датчика уже предусмотрена функция с предустановленными алгоритмами обработки данных. Эти алгоритмы обеспечивают анализ входных сигналов, включая фильтрацию, нормализацию и интерпретацию данных.

Следует отметить, что при реализации на реальном роботе были выявлены корректировки данных, связанные с изменением уровня освещенности. Эти изменения учитываются в моде-

лировании, где предусмотрена возможность активации соответствующего режима моделирования. Такой подход позволяет повысить точность моделирования и приближение работы сенсоров к реальным условиям эксплуатации.

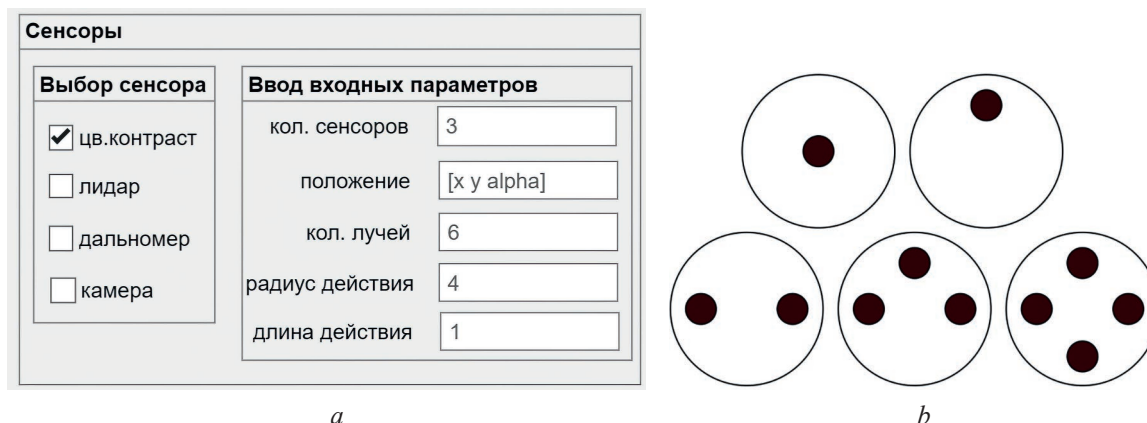


Рис 4. Реализация блока «Сенсоры»: а – интерфейс блока; b – количество и расположение сенсоров
Fig. 4. Implementation of the “Sensors” block: a – block interface; b – number and location of sensors

«Внешняя среда». Этот раздел представляет структуру выбора и настройки внешней среды, где происходит выбор карты и ее типа, определяется целевая функция для решения задач оптимизации или управления (из раздела «Оптимизация») и для каждого объекта (из раздела «Кинематика»). Процесс начинается с выбора карты, которая задает геометрическую форму или конфигурацию пространства. В качестве вариантов доступны эллипс, квадрат, окружность или сложная карта, что позволяет учитывать различные формы и сложности среды. Далее уточняется тип карты, который может быть представлен в численной или аналоговой форме. Числовой формат карты – это дискретное представление пространства в виде матрицы, которая содержит реальные препятствия, аналоговый формат – непрерывное представление пространства, где координаты и препятствия задаются в виде функций (формул). Данные, сформированные от выбранной карты, преобразовываются в оттенки серого, масштабируются в необходимые метры/пиксели и передаются в раздел «Сенсоры» для корректной работы последних.

На следующем этапе задается/определяется целевая функция, которая формируется (уже разработана/сформирована) в зависимости от выбранной карты и типа задачи (рис. 5). Целевая функция уже адаптирована для различных методов, таких как ГА, RL или IRL. Таким образом, схема обеспечивает гибкость настройки среды и целевой функции для моделирования и оптимизации в зависимости от заданных параметров и задач. Что касается колесных роботов, существует возможность добавить визуализатор движения робота по карте (добавить галочку).

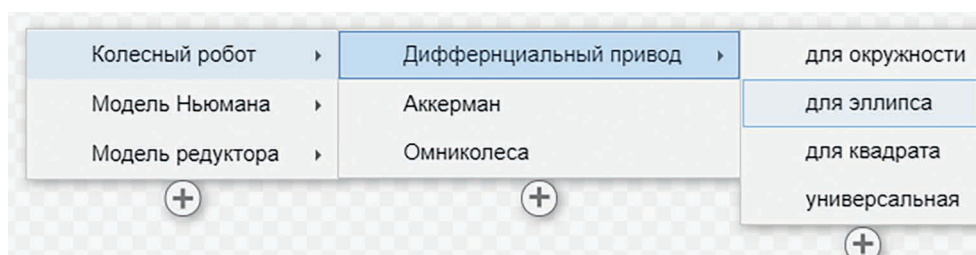


Рис. 5. Реализация блока «Внешняя среда»
Fig. 5. Implementation of the “External Environment” block

«Оптимизация». В разделе представлен блок, где происходит процесс оптимизации, в котором реализованы три эволюционных метода: ГА, RL и IRL. На рис. 6 показаны общие входные данные, отмеченные красным цветом. Они поступают из раздела «Внешняя среда» и являются общими данными для работы всех трех алгоритмов; включают параметры карты и целевой функции, которые используются независимо от выбранного метода оптимизации. Черные стрелки на рис. 6 обозначают отдельные параметры, задаваемые индивидуально для каждого из алгоритмов.

мов. Эти параметры позволяют адаптировать работу системы под особенности конкретного метода, будь то ГА, RL и IRL. Тот же принцип действует и для выходного сигнала блока «Оптимизация».



Рис. 6. Реализация входных и выходных данных в блоке «Оптимизация»

Fig. 6. Implementation of input and output data in the “Optimization” block

Практическое применение технологии создания цифрового двойника с возможностью адаптивного управления

Благодаря имеющейся возможности, исследования проводились на реальном антропоморфном роботе. Однако, как известно, тестирование на физических роботах ведет к высоким затратам ресурсов, временным издержкам и рискам повреждения оборудования. В связи с этим был разработан цифровой двойник на базе предложенной технологии, позволяющий безопасно тестировать и оптимизировать алгоритмы управления в виртуальной среде до их внедрения на реальном роботе. Воспользуемся разработанной технологией создания цифровых двойников адаптивного управления. В качестве примера рассмотрим задачу программирования имитации походки антропоморфного робота, целью которого является плавно и устойчиво двигаться шагом по ровной поверхности.

Для дальнейшей работы над моделью было принято решение преобразовать ее в специализированные блоки библиотеки Simscape MATLAB/Simulink. Нижние конечности робота оснащались вращательными суставами с крутящим моментом, а руки робота имели пассивные вращающиеся суставы, что способствовало более естественному движению. Для обеспечения правильного функционирования модели выставлялись ограничения по углам в каждом суставе, это предотвращало чрезмерные и неестественные движения робота. Чтобы модель воспринимала пол как твердую поверхность, подключались контактные силы, что позволяло учитывать влияние силы тяжести и других факторов. Настройка контактных сил приближает моделирование к реальному миру, используя параметры жесткости и демпфирования для управления каждым суставом, а также для реализации взаимодействия с конкретной поверхностью, а точнее – с грунтом.

В этом этапе исследования роль сенсоров выполняли блоки Transform sensors¹ и Bushing joint², которые измеряли величины (включающие относительную позу, скорость и ускорение), перемещение детали робота в пространстве и контролировали демпферы для смягчения движения (назовем их сенсорами корпуса). Роль карты выполняла поверхность, по которой передвигался робот. Затем формировалась целевая функция для оценки походки робота, которая обновлялась в каждый момент времени. Целевая функция оценивает такие критерии, как скорость движения вперед, вертикальное смещение, боковое смещение, потребление электроэнергии (робот выполняет меньше действий, но качественно). Далее выбирался метод оптимизации обучения с подкреплением. Настройка, запуск метода, а также результаты имитации человеческой ходьбы будут рассмотрены подробно в последующих исследованиях.

На основе реального антропоморфного робота и предложенных методов была реализована программная технология управления роботом на базе цифрового двойника, представляющая собой совокупность алгоритмов, методов и действий, направленных на многократное повторяемое воспроизводство технологического процесса (рис. 7).

Обозначения для рис. 7: прямые линии – физические сигналы, передаваемые между блоками; 1 – сигнал в диапазоне $[-1; 1]$, формирует результат работы RL; 2 – блок «Система управления» преобразует сигнал в крутящий момент, учитывая демпфирование, жесткость, а также положение и скорость каждого сустава (3); 4 – блок «Сенсоры» передает информацию о направлении робота, выходные данные блока «Сенсоры» корпуса, данные с сигнала (3) и крутящий момент (2); 5 – блок «Целевая функция» передает оценочные данные и сформированную награду выбранно-

¹ Transform Sensor. Mode of access: <https://www.mathworks.com/help/sm/ref/transformsensor.html>.

² Bushing Joint. Mode of access: <https://www.mathworks.com/help/sm/ref/bushingjoint.html>.

му методу, а также дополнительную информацию о среде, включая данные о контактной силе, сенсоры корпуса и (3).

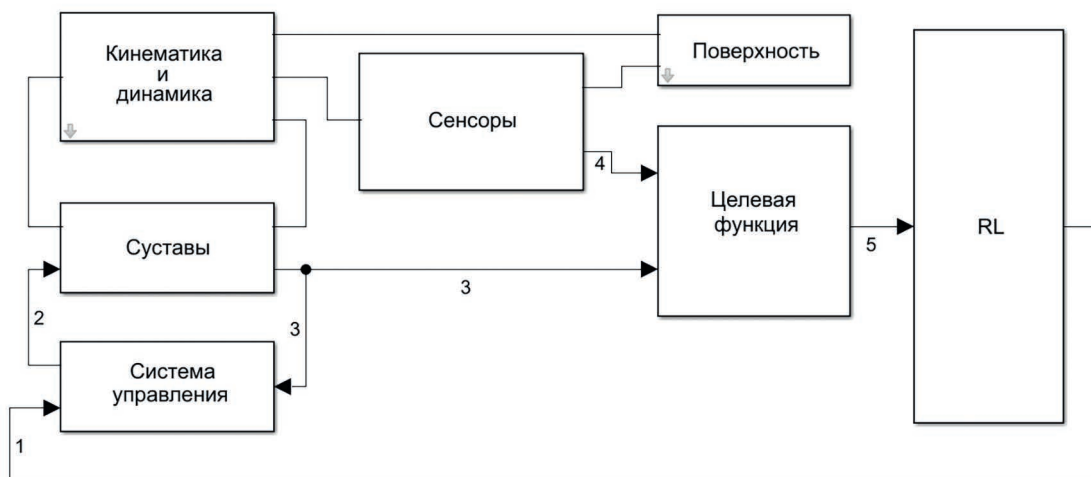


Рис. 7. Цифровой двойник антропоморфного робота с применением обучения с подкреплением в среде Simulink

Fig. 7. Digital twin of an anthropomorphic robot using reinforcement learning in the Simulink

В программе полноценной технологии уже подготовлены модели для работы отдельно с манипулятором, где ноги статичны, с педипулятором, где руки в пассивном вращении, и полноценный робот со всеми активными вращающимися суставами. На примере антропоморфного робота (рис. 8) выбирался тип модели педипулятора, задавались входные параметры в допустимых рамках.

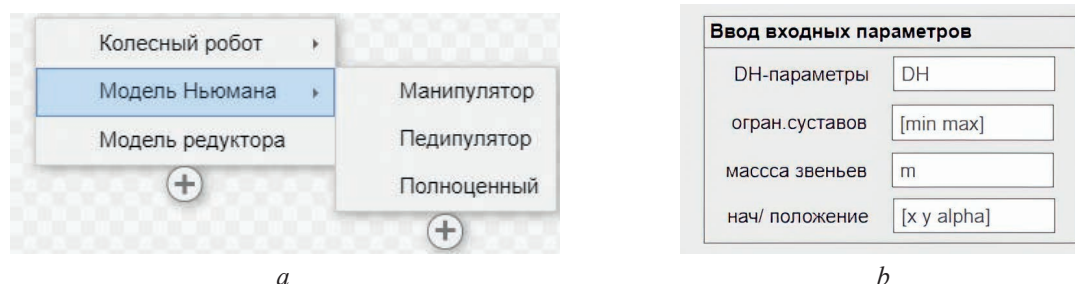


Рис. 8. Антропоморфный робот: *a* – выбор отдельных частей робота в блоке «Кинематика»; *b* – входные параметры для робота

Fig. 8. Anthropomorphic robot: *a* – selection of individual parts of the robot in the “Kinematics” block; *b* – input parameters for the robot

Рассмотренная технология создания цифровых двойников представляет собой структурированную схему, в которой выделены основные блоки: «Кинематика», «Сенсоры», «Внешняя среда» и «Оптимизация» (рис. 9).

Проведенное исследование позволило разработать и апробировать технологию создания цифрового двойника на примере антропоморфного робота. Применение данной технологии направлено на минимизацию временных затрат и снижение вероятности ошибок на этапах моделирования и верифицировании. Кроме того, технология продемонстрировала повышение надежности реализации и проверки методов управления.

Заключение

1. Технология создания цифровых двойников представляет собой гибкость и модульность, что дает возможность комбинирования с имеющимися компонентами. В среде MATLAB/Simulink были созданы блоки управления (программы), которые позволяют по параметрам, указанным в поставленной задаче, переходить от одного блока к следующему, детально расписывая ветви каждого блока.

The interface is divided into four main sections:

- Кинематика (Kinematics):**
 - Выбор объекта (Object Selection):** Колесный робот, Модель Ньюман, Модель редукто..
 - Выбор модели (Model Selection):** ☒ мат. модель, ☐ тверд. модель
 - Ввод входных параметров (Input Parameters):**
 - лин. скорость:
 - угл. скорость:
 - рад. колеса:
 - ширина базы:
 - нач. положение:
- Сенсоры (Sensors):**
 - Выбор сенсора (Sensor Selection):** ☒ цв. контраст, ☐ лидар, ☐ дальномер, ☐ камера
 - Ввод входных параметров (Input Parameters):**
 - кол. сенсоров:
 - положение:
 - кол. лучей:
 - радиус действия:
 - длина действия:
- Внешняя среда (External Environment):**
 - Карты (Maps):** ☐ эллипс, ☐ квадрат, ☐ окружность, ☒ сложная карта
 - Тип карты (Map Type):** ☐ численная, ☐ аналоговая, ☒ загрузить
 - Целевая функция (Objective Function):** Колесный робот, Модель Ньюман, Модель редукто..
- Оптимизация (Optimization):**
 - метод оптимизации (Optimization Method):** ☒ генетический алгоритм, ☐ обучение с подкреплением, ☐ подражательное обучение

A green play button labeled "Start" is located at the bottom right.

Рис. 9. Полноценная технология создания цифровых двойников
Fig. 9. Comprehensive digital twin development technology

2. Технология демонстрирует значительный потенциал для создания цифровых двойников с адаптивными системами управления, способных к эффективной работе в сложных и динамичных условиях. Применение таких методов, как генетические алгоритмы и обучение с подкреплением, способствует автоматическому улучшению навыков робота, его адаптации к новым задачам и оптимальному использованию ресурсов. Благодаря возможности предварительного тестирования в симуляционной среде создается основа для разработки надежных решений, которые легко масштабируются и модифицируются в соответствии с потребностями пользователя.

3. Работа выполнена при поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований Ф23МЭ-030 «Эволюционные методы генерации оптимальных структур высокопроизводительных аппаратных ускорителей для реализации искусственных нейронных сетей на базе перепрограммируемых логических интегральных схем» и в рамках задания 1.3.1. ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства», подпрограмма «Цифровые технологии и космическая информатика».

Список литературы

1. Stjepandić, J. Digital Twin: A Conceptual View / J. Stjepandić // An Approach for Production Process Optimization in a Built Environment. Cham: Springer, 2022.
2. Ким, Т. Ю. Разработка цифрового двойника антропоморфного робота «Астронавт» с применением метода обучения с подкреплением в режиме реального времени / Т. Ю. Ким // Молодежь в науке. Минск, 2022. С. 419–422.
3. Прокопович, Г. А. Разработка системы управления учебным роботом-манипулятором параллельной структуры с применением технологии модельно-ориентированного проектирования / Г. А. Прокопович // Информатика. 2019. Т. 16, № 4. С. 99–114.
4. Ким, Т. Ю. Метод оптимизации массы деталей редуктора при изготовлении с помощью 3D-печати на основе генетического алгоритма / Т. Ю. Ким, А. В. Печковская, Е. И. Печковский // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. 2024. Т. 21, № 3. С. 32–46.
5. Ким, Т. Ю. Имитационное моделирование движения двухколесного робота RoboCake на горизонтальной плоскости / Т. Ю. Ким, Г. А. Прокопович // Молодежь в науке – 2020: тез. докл. XVII Междунар. науч. конф., Минск, 22–25 сент. 2020 г. Минск: Беларус. навука, 2020. С. 398–400.
6. Ким, Т. Ю. Оптимизация коэффициентов ПИД-регулятора системы управления движением мобильного робота по цветоконтрастной линии на основе генетического алгоритма / Т. Ю. Ким, Г. А. Прокопович // Информатика. 2021. Т. 18, № 4. С. 53–68.

7. Ким, Т. Ю. Исследование влияния способа формирования функции вознаграждения по методу «двойника» для алгоритма обучения с подкреплением / Т. Ю. Ким, Г. А. Прокопович // Информационно коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации (ИКТ–2024): электр. сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф., Полоцк, 29 марта 2024 г. Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т, 2024. С. 93–97.
8. Kim, T. Automatic Tuning of the Motion Control System of a Mobile Robot Along a Trajectory Based on the Reinforcement Learning Method / T. Kim, R. Prakapovich // Communications in Computer and Information Science. 2022. Vol. 1562. P. 234–244.
9. Ким, Т. Ю. Разработка метода подражательного обучения для нейросетевой системы управления движением мобильного робота на примере задачи поиска выхода из лабиринта / Т. Ю. Ким, Г. А. Прокопович // Информатика. 2024. Т. 21, № 3. С. 32–46.
10. Ким, Т. Ю. Обучение мобильного робота передвижению в неизвестной среде с применением метода обучения с подкреплением // Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере (ITI'2023): матер. 12-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: Объед. инст-т проблем информ. НАН Беларуси, 2023. С. 78–81.
11. Research on Autonomous Lift Control Method of Hovercraft Based on DDPG / Y. Wang [et al.] // Искусственный интеллект в Беларуси: матер. III форума IT-Академграда. Минск: НАН Беларуси, 2024. С. 336–347.
12. Engineers' CAx Education – It's Not Only CAD / C. W. Dankwort [et al.] // Computer-Aided Design. 2004. Vol. 36, No 14. P. 1439–1450. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2004.02.011>.

Поступила 23.04.2025

Принята в печать 27.06.2025

Доступна на сайте 10.10.2025

References

1. Stjepandić J. (2022) Digital Twin: A Conceptual View. *An Approach for Production Process Optimization in a Built Environment*. Cham, Springer.
2. Kim T. Yu. (2022) Development of a Digital Twin for an Anthropomorphic “Astronaut” Robot Using Real-Time Reinforcement Learning. *Youth in Science*. Minsk. 419–422 (in Russian).
3. Prokopovich G. A. (2019) Development of a Control System for an Educational Parallel-Structure Manipulator Robot Using Model-Based Design Technology. *Informatics*. 16 (4), 99–114 (in Russian).
4. Kim T. Y., Pechkovskaya A. V., Pechkovsky E. I. (2024) Mass Optimization Method for Gearbox Parts Manufactured by 3D Printing Based on a Genetic Algorithm. *Journal of the Belarusian State University. Mathematics. Informatics*. 21 (3), 32–46 (in Russian).
5. Kim T. Y., Prokopovich G. A. (2020) Simulation of Two-Wheeled RoboCake Robot Motion on a Horizontal Plane. *Youth in Science – 2020, Proc. XVII Int. Sci. Conf.* Minsk, Belaruskaya Navuka. 398–400 (in Russian).
6. Kim T. Y., Prokopovich G. A. (2021) Optimization of PID Controller Coefficients for Mobile Robot Motion Control System Along a Color-Contrast Line Using a Genetic Algorithm. *Informatics*. 18 (4), 53–68 (in Russian).
7. Kim T. Y., Prokopovich G. A. (2024) . Study of the Influence of Reward Function Formation Method Using the “Twin” Approach for Reinforcement Learning Algorithms. *Information and Communication Technologies: Achievements, Problems, Innovations (ICT–2024): Electronic Collection of Articles of the III International Scientific and Practical Conference, Polotsk, March 29*. Novopolotsk, Polotsk State University. 93–97 (in Russian).
8. Kim T., Prakapovich R. (2022) Automatic Tuning of the Motion Control System of a Mobile Robot Along a Trajectory Based on the Reinforcement Learning Method. *Communications in Computer and Information Science*. 1562, 234–244.
9. Kim T. Y., Prokopovich G. A. (2024) Development of Imitation Learning Method for Neural Network Control System of Mobile Robot Using Maze Exit Search Task. *Informatics*. 21 (3), 32–46 (in Russian).
10. Kim T. Y. (2023) Training a Mobile Robot to Navigate in an Unknown Environment Using Reinforcement Learning. *Information Technologies in Industry, Logistics and Social Sphere (ITI'2023): Proceedings of the 12th International Scientific and Technical Conference*. Minsk, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus. 78–81 (in Russian).
11. Wang Y., Qin Z., Kim T. Y., Wu P., Cheng P., Zhang X., et al. (2024) Research on Autonomous Lift Control Method of Hovercraft Based on DDPG. *Artificial Intelligence in Belarus: Proceedings of the III IT-Akademgrad Forum*. Minsk, National Academy of Sciences of Belarus. 336–347.
12. Dankwort C. W., Weidlich R., Guenther B., Blaurock J. E. (2004) Engineers' CAx Education – It's Not Only CAD. *Computer-Aided Design*. 36 (14), 1439–1450. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2004.02.011>.

Received: 23 April 2025

Accepted: 27 June 2025

Available on the website: 10 October 2025

Вклад авторов

Ким Т. Ю. описала теоретические основы технологии создания цифровых двойников, выполнила программную реализацию технологии создания цифровых двойников с возможностью адаптивного управления, провела вычислительные эксперименты, проанализировала полученные результаты, подготовила рукопись статьи.

Прокопович Г. А. предложил концепцию технологии создания цифровых двойников, предоставил экспертные рекомендации по параллельному манипулятору, поделился практическим опытом в области управления динамическими системами.

Authors' contribution

Kim T. Yu. described the theoretical foundations of the technology for creating digital twins, implemented a software solution for the technology with adaptive control capabilities, conducted computational experiments, analyzed the obtained results, prepared the manuscript of the article.

Prakapovich G. A. proposed a concept for the technology of creating digital twins, provided expert recommendations on a parallel manipulator, and shared practical experience in the field of managing dynamic systems.

Сведения об авторах

Ким Т. Ю., мл. науч. сотр. лаб. робототехнических систем № 116, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси

Прокопович Г. А., канд. техн. наук, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси

Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь,
Минск, ул. Сурганова, 6
Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси
Тел.: +375 17 270-31-75
E-mail: tatyana_kim92@mail.ru
Ким Татьяна Юрьевна

Information about the authors

Kim T. Yu., Junior Researcher of the Laboratory of Robotic Systems No 116, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus

Prakapovich R. A., Cand. Sci. (Tech.), The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus

Address for correspondence

220072, Republic of Belarus,
Minsk, Surganova St., 6
The United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus
Tel.: +375 17 270-31-75
E-mail: tatyana_kim92@mail.ru
Kim Tatyana Yuryevna