

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ИНФОРМАТИКИ
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

УДК 004.942, 519.876.5

КИМ
Татьяна Юрьевна

**ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ
МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ
ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.18 - Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

Минск 2026

Научная работа выполнена в государственном научном учреждении «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси».

Научный руководитель **Недзведь Александр Михайлович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных систем управления ФПМИ БГУ

Официальные оппоненты **Татур Михаил Михайлович**, доктор технических наук, профессор кафедры электронных вычислительных машин БГУИР

Крощенко Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры интеллектуальных информационных технологий БрГТУ

Оппонирующая организация Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой

Защита состоится «5» мая 2026 г. в 14:30 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.04.01 при государственном научном учреждении «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси» по адресу: 220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6, ауд. 206. Тел.: (017) 270 31 75, e-mail: itekan@newman.bas-net.by.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Якуба Коласа Национальной академии наук Беларуси.

Автореферат разослан «30» марта 2026 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций, кандидат технических наук



Э. В. Снежко

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в робототехнике достигнут прогресс, позволивший разработать сложные мобильные роботы, далее — роботы, ориентированные на эффективные системы управления, адаптируемые к изменяющимся условиям и автономному выполнению задач. Применяемые в различной деятельности человека.

Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения эффективности функционирования роботов в условиях динамически изменяющейся среды. В работе исследуются методы управления роботами, обеспечивающие адаптивное поведение робота в ходе взаимодействия со средой, что позволяет повысить устойчивость и точность движения.

В диссертации разработана технология создания цифровых двойников (ЦД) робота, основанная на создании имитационных моделей кинематической системы робота и адаптивной системы его управления, в том числе эволюционных алгоритмов и методов машинного обучения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными проектами и темами. Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь, утвержденным Указом Президента №156 от 7 мая 2020 г. «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг.», в части пункта 1 «Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии, основанные на них производства: искусственный интеллект и робототехника», а также Указом Президента №135 от 1 апреля 2025 г. «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2026-2030 гг.», в части пункта 1 «Цифровые технологии и искусственный интеллект: математические теории и методы, высокопроизводительные вычислительные системы, цифровые модели и двойники».

В рамках данной диссертации решается комплекс задач, предусмотренных нормативно-правовыми актами в сфере цифровизации и развития интеллектуальных технологий в Республике Узбекистан, включая Постановление Президента Республики Узбекистан №ПП–4699 от 28 апреля 2020 г. «О мерах по широкому внедрению цифровой экономики и электронного правительства», Указ №УП–6079 от 5 октября 2020 г. «Об утверждении стратегии «Цифровой Узбекистан – 2030» и мерах по ее эффективной реализации», а также Постановление №ПП–4996 от 17

февраля 2021 г. «О мерах по созданию условий для ускоренного внедрения технологий искусственного интеллекта».

Исследования, представленные в диссертации, использованы при выполнении следующих научно-исследовательских работ: БРФФИ Ф20Р–324 «Вычислительно эффективные методы навигации группы автономных колесных роботов в динамической среде», № ГР НИОКТР 20201322, 2020-2022 гг.; ГКНТ–Китай Ф22КИТГ-002 «Медицинские роботы на основе человеко-машинного взаимодействия», № ГР НИОКТР 20230013, 2022-2024 гг.; «Модели и методы для систем поддержки принятия решений при планировании и управлении высокотехнологичными, роботизированными производствами и электротранспортом» задания 1.3.1. ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства», подпрограмма «Цифровые технологии и космическая информатика», № ГР 20210917, 2021–2025 гг.; БРФФИ Ф23МЭ-030 «Эволюционные методы генерации оптимальных структур высокопроизводительных аппаратных ускорителей для реализации искусственных нейронных сетей на базе перепрограммируемых логических интегральных схем», № ГР 20231036, 2023-2025 гг. (Конкурс Микроэлектроника-2023); БРФФИ Ф25КИ-044 «Методы прогрессивного комплексирования данных для мультисенсорных систем и их применение», № ГР 20250312, 2025-2027 гг.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью настоящего исследования является разработка технологии управления движением мобильных роботов в динамической среде с применением алгоритмов интеллектуального анализа взаимодействия робота с окружающей средой для принятия оптимальных управляющих решений. Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

1. Разработать методику форсированного управления транспортными роботами в логистических складах, обеспечивающую минимизацию времени перемещения при соблюдении динамических ограничений и предотвращении столкновений.

2. Разработать имитационную модель кинематической системы мобильного робота и создать его ЦД, интегрированный со средствами адаптивного управления, для последующего тестирования, отладки и верификации алгоритмов управления в виртуальной среде.

3. Разработать метод автоматической настройки параметров ПИД-регулятора для управления мобильным роботом при движении по цветоконтрастной линии, основанный на применении генетического алгоритма (ГА) и обучения с подкреплением (Reinforcement Learning, RL) в среде ЦД.

4. Разработать модель для обучающей системы на основе обучения с подкреплением, обеспечивающую автономное приобретение навыков и копирование паттернов поведения в условиях неопределенности на примере задачи навигации в лабиринте.

5. Разработать технологию создания ЦДов мобильных роботов, основанную на интеграции имитационных моделей кинематики и адаптивных систем управления, обеспечивающую воспроизводимость, масштабируемость и высокую степень соответствия поведению реальных роботов в динамической среде.

6. Провести верификацию, оценку эффективности разработанных методов и моделей в условиях различных сценариев функционирования.

Объектом исследования являются системы управления мобильными транспортными роботами. **Предметом исследования** являются методы и алгоритмы систем адаптивного управления мобильными роботами, предназначенными для передвижения по местности с недостаточным объемом априорной информации.

Научная новизна

1. Разработана методика форсированного управления транспортными роботами в логистических складах, основанная на классификации маршрутов движения по различным типам траекторий и построении соответствующих циклограмм режимов работы. В рамках методики реализована модель движения, позволяющая определять минимально возможное время перемещения с учетом динамических характеристик каждого класса траекторий и предотвращать нежелательные столкновения на участках движения. Методика применима как к управлению одиночными роботами, так и для их групп.

2. Разработан метод автоматической настройки параметров ПИД-регулятора для управления движением цифрового двойника мобильного робота по цветоконтрастной линии, основанный на применении генетического алгоритма и обучения с подкреплением в среде цифрового двойника. Предложен критерий для оценки качества траектории движения робота, состоящий в минимизации отклонения центра масс робота от заданной траектории и угла между центральной осью робота и направлением касательной к заданной траектории в соответствующей точке. Использование такого критерия позволило сократить время настройки по сравнению с классическими методами.

3. Разработана модель для обучающей системы, состоящая из двух активных агентов, взаимодействующих между собой посредством специализированных обратных связей по скорости и положению, что позволяет Агенту-Ученику самостоятельно приобретать новые навыки на заранее неизвестной карте и копировать паттерны поведения

Агента-Эксперта. Эффективность подхода продемонстрирована на задаче поиска пути выхода из лабиринта для мобильного робота, оснащенного лидаром. Предложенная модель основана на применении метода обучения с подкреплением.

4. Разработана новая технология создания цифровых двойников мобильных роботов, основанная на объединении имитационных моделей кинематической системы робота и адаптивной системы его управления и отличающаяся унификацией архитектуры цифровых двойников различной сложности.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика форсированного управления транспортными роботами в логистических складах, отличающаяся разделением маршрутов по типам траекторий, для которых заданы циклограммы с предельными значениями скорости и ускорения. В рамках методики реализована модель движения, позволяющая проходить маршруты за минимально возможное время, ограниченное только динамическими характеристиками двигателей, а также минимизировать время движения и предотвращать нежелательные столкновения за счет постоянного управления скоростью и направлением движения каждого роботов.

2. Метод автоматической настройки параметров ПИД-регулятора для управления движением цифрового двойника мобильного робота по цветоконтрастной линии, основанный на применении генетического алгоритма и обучения с подкреплением. В отличие от классических подходов, метод учитывает заданные кинематические и динамические параметры робота и использует предложенный критерий оценки качества траектории, заключающийся в минимизации отклонения центра масс робота от заданной траектории и угла между центральной осью робота и направлением касательной к траектории в соответствующей точке, что позволяет сократить время настройки за счет реализации процесса в среде цифрового двойника без пробных запусков на физическом объекте.

3. Модель для обучающей системы основанная на взаимодействии двух агентов посредством специализированных каналов обратной связи по скорости и положению, что позволяет мобильному роботу самостоятельно адаптировать движения по неизвестной карте и копировать паттерны поведения Эксперта. В отличие от классических методов обучения с подкреплением, предложенный подход обеспечивает быстрое формирование устойчивой навигационной стратегии, способность к успешной адаптации к новой карте и снижение среднего отклонения от центра коридора до 0,11 м, что делает его применимым в динамических и слабо структурированных средах.

4. Новая технология создания цифровых двойников мобильного робота, основанная на интеграции имитационной модели системы управления с кинематической и динамической моделями робота и отличающаяся унификацией архитектуры цифровых двойников различной сложности, что позволяет осуществлять их последовательную разработку, настройку и верификацию в едином информационном пространстве, обеспечивая существенное сокращение времени прототипирования и упрощая внедрение современных методов адаптивного управления.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты и положения, выносимые на защиту, получены автором лично. Разработанные методика, метод, модель и технология создания цифровых двойников, а также проведенные экспериментальные исследования выполнены соискателем самостоятельно. Научный руководитель участвовал в формулировке целей исследования, их предварительном рассмотрении, а также в обсуждении полученных результатов. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками излагаемых в диссертационной работе результатов.

Апробация результатов диссертации. Материалы и результаты диссертационного исследования были представлены и обсуждены на следующих международных конференциях: XXVII Международный молодежный научный форум «ЛОМОНОСОВ–2020» (Москва, Россия, 2020); Международная научная конференция молодых ученых «Молодежь в науке» (Минск, 2020–2022); Международная конференция «Наука и инновации» (Ташкент, Узбекистан, 2020); X Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (Санкт-Петербург, 2021); International conference on pattern recognition and information processing (Минск, 2021, 2025); X Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении» (Минск, 2022); Международная научно-практическая конференция «Компьютерные технологии и анализ данных» (Минск, 2022, 2024); Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии, сети и телекоммуникации – ITN&T.2023» (Ургенч, Узбекистан, 2023); 12-я Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере» (Минск, 2023); Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра», проводимая в научно-техническом центре комбайностроения ОАО «Гомсельмаш» (Гомель, 2023–2024); III Международная научно-практическая конференция

«Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации» (Полоцк, 2024); IV Международный форум IT-Академграда «Искусственный интеллект в Беларуси» (Минск, 2025); 11-й Международный конгресс по информатике «Информационные системы и технологии» (Минск, 2025); 3rd International symposium on special ships and intelligent systems “Integration and innovation, autonomous empowerment, and a green future” (Sanya, China, 2025).

Опубликованность результатов диссертации. По итогам проведенного диссертационного исследования опубликовано 27 научных работ, отражающих основные положения и результаты исследования. В их числе — 7 статей, размещенных в рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Беларусь для публикации материалов диссертационных исследований; а также 20 публикаций в сборниках материалов научных конференций и семинаров. Общий объем опубликованных работ составляет 11,875 авторского листа.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает термины и определения, перечень сокращений и обозначений, введение, общую характеристику работы, четыре главы, заключение, библиографический список и приложения. Общий объем диссертации составляет 131 страниц, из которых 46 рисунков и 11 таблиц размещены на 22 страницах; приложения представлены на 37 страницах и включают 6 разделов; список использованных источников содержит 97 наименований, размещенных на 10 страницах; перечень публикаций автора по теме диссертации включает 27 наименования и занимает пять страниц.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во введении обосновывается научная и практическая актуальность диссертационного исследования, а также приводится критический анализ современного состояния изученности темы на основе обзора отечественных и зарубежных научных источников.

В первой главе проведен сравнительный анализ различных программных платформ, используемых для создания имитационных моделей: Webots, CoppeliaSim, ROS/Gazebo и MATLAB/Simulink. Оценка проведена по критериям точности физического моделирования, удобства разработки, интеграции с алгоритмами управления и возможностям визуализации.

ЦД рассматривается как имитационная модель, объединяющая кинематическую, динамическую и управляющую компоненты реальной системы.

Анализ традиционных методов управления показал, что классические ПИД-регуляторы, хотя и широко применяются, имеют ограниченную адаптивность. При увеличении скорости или изменении траектории система может терять устойчивость, что делает необходимым переход к более гибким методам.

В качестве перспективных подходов рассмотрены ГА и RL. ГА эффективен для поиска субоптимальных параметров в сложных пространствах решений, но могут требовать значительных вычислительных ресурсов. RL, в свою очередь, позволяет агенту самостоятельно учиться на взаимодействии со средой [7–А].

В первой главе представлен анализ теоритичеких и практических аспектов создания ЦД робота с адаптивным управлением. Это позволило обосновать выбор инструментов и методов и формулировки основных целей и задач диссертационного исследования.

Во второй главе рассматривается задача оптимизации движения робота в частично известному маршруту с использованием ЦДов. Глава охватывает два ключевых аспекта управления: во-первых, разработку методики форсированного управления для минимизации времени прохождения прямолинейных участков маршрута на складе за счет классификации ломанной траекторий и формирования циклограмм скорости и ускорения, что позволяет прогнозировать и избегать столкновений при групповом движении; во-вторых, настройку системы слежения за цветоконтрастной линией по замкнутой криволинейной траектории (эллипс) с помощью ЦД мобильного робота в среде MATLAB/Simulink, где для настройки параметров ПИД-регулятора применяются ГА и RL, что обеспечило высокую точность и адаптивность управления [1–А].

В первой части главы разработана методика форсированного управления движением транспортных роботов в логистических складах по ломанной траектории и направленная на минимизацию времени перемещения при соблюдении ограничений по безопасности и устойчивости движения. Методика основана на классификации траекторий по типам движения — разгон, равномерное движение, торможение и поворот на месте — с построением циклограмм скорости, адаптированных к длине участков маршрута. Учет динамических параметров — максимальной скорости (V_{max}), ускорения разгона (a_a) и торможения (a_b) — позволяет формализовать задачу оптимального быстродействия. Реализация методики включает три этапа: анализ траектории и ее разбиение на типы движения, расчет временных интервалов на основе построенных циклограмм и непосредственное управление маневрами робота.

На первом этапе маршрут, разбивается на элементарные участки: прямолинейные отрезки и точки поворота. Каждый участок S_k классифицируется как движение с ускорением, равномерное или торможение. Для поворотов на месте вычисляется угловая скорость.

На втором этапе производится расчет времени движения на каждом участке. Получены аналитические формулы для определения общего времени T в зависимости от длины S_k .

$$T = \begin{cases} \frac{V_{\max}(a_a + a_b)}{2a_a a_b} + \frac{S_k}{V_{\max}} & \text{если } S_k > S_{Th}, \\ \sqrt{\frac{2S_k(a_a + a_b)}{a_a a_b}} & \text{если } S_k \leq S_{Th}, \\ \sqrt{\frac{\pi b \alpha (a_a + a_b)}{180 \cdot a_a a_b}} & \text{при повороте на } 90^\circ, \end{cases} \quad (1)$$

где $S_{Th} = \frac{V_{\max}^2(a_a + a_b)}{2a_a a_b}$ пороговое расстояние, при котором робот успевает разогнаться до максимальной скорости и затем затормозить. При $S_k > S_{Th}$ реализуется полный цикл движения (разгон–равномерное движение–торможение); при $S_k \leq S_{Th}$ — только разгон и торможение без выхода на максимальную скорость.

На третьем этапе реализован блок управления маневрами в Simulink в виде конечного автомата. На вход подаются текущее время и длина участка S_k , на выходе формируется требуемая линейная скорость. Блок автоматически выбирает из набора временных параметров $\tau = (t_1, t_2, t_3)$ или $\tau = (t_1, t_3)$, в зависимости от условия достижения V_{max} , обеспечивая плавное и предсказуемое движение.

Верификация проведена в три этапа. На первом этапе построена граф-схема маршрутов для склада, включающего 16 помещений, загрузочную и зарядную станции. Анализ плотности траекторий позволил выявить наиболее нагруженные участки и спрогнозировать точки потенциальных коллизий. На втором этапе численное моделирование подтвердило эффективность методики: при движении на 24 м время прохождения составило 32,14 с; при коротком участке 1,7 м — 4,26 с. При повороте на 90° затраченное время составило 2,05 с при текущей скорости $V_{max} = 0,384$ м/с. На третьем этапе смоделировано движение до 16 роботов в условиях высокой загрузки. Показано, что методика позволяет прогнозировать столкновения за счет расчета положения каждого робота в реальном времени. В эксперименте с четырьмя роботами, направляющимися в одну точку, время прибытия варьировалось от 27,8с (робот 3, 2 поворота) до 94,7 с (робот 4, 6 поворотов), при этом все траектории были свободны от коллизий. Гистограмма использования участков показала, что наиболее загруженным является отрезок 12 м.

Результаты демонстрируют адаптивность методики как для одиночных роботов, так и для групп. Разработанная система применима в автоматизированных складах, медицинских учреждениях и производственных линиях, обеспечивая повышение эффективности логистических процессов.

Во второй части главы разработан и обоснован метод автоматической настройки параметров ПИД-регулятора для управления ЦД мобильным роботом при движении по линейным и нелинейным участкам цветоконтрастной линии со скоростью 1 м/с. Задача настройки ПИД-регулятора сводится к поиску субоптимальных значений четырех параметров: K_p , K_i , K_d и N . Метод основан на двух формализованных критериях качества: целевой функции для ГА и функции вознаграждения для RL, каждая из которых количественно оценивает отклонение робота от траектории и устойчивость движения.

Процесс оптимизации осуществлялся на ЦД мобильного робота RoboCake (масса – 400 г, дифференциальный привод, радиус колеса – 2,5 см, межосевое расстояние – 8,5 см, ширина – 16,9 см, длина корпуса – 17,1 см, три датчика QRE1113) в среде MATLAB/Simulink, учитывающий кинематические и динамические свойства системы, включая инерцию, трение и функционирование сенсоров.

Это позволило создать замкнутую систему управления с обратной связью по отклонению от цветоконтрастной линии, где нормализованная ошибка положения $Y = \frac{1}{2}L + F - \frac{1}{2}R$ формируется на основе показаний трех оптических датчиков и используется для непрерывной коррекции направления движения. Значения яркости отраженного света L , F и R (левый, центральный и правый датчики соответственно) даны в диапазоне 15–1004 условных единиц.

Настройка параметров ПИД-регулятора осуществлялась на эллиптической кривой с полуосями 1 м и 0,5 м, где геометрические параметры эталонной кривой извлекались непосредственно из загруженной цифровой карты трассы, что обеспечивало адаптацию цифрового двойника к реальным условиям эксплуатации.

Этап 1: Анализ классических методов настройки ПИД-регулятора

Перед применением интеллектуальных методов оптимизации были проведены эксперименты с классическими подходами [1–А]:

С помощью ручной настройки, методом проб и ошибок найдено несколько рабочих наборов коэффициентов, обеспечивающих движение только при скорости 0,3 м/с. При увеличении скорости до 1 м/с робот сходил с линии на участках с высокой кривизной. Среднее время прохождения составило 15,3 с. Стандартное отклонение – $\pm 1,73$ с,

коэффициент вариации — 11,3 %. Наилучший результат — 12,8 с, наихудший — 17,2 с.

С помощью метода Циглера–Николса реализован расчет коэффициентов по методу граничной устойчивости. Однако из-за существенной нелинейности модели полученные значения, привели к сильным колебаниям и потере устойчивости уже при скорости 0,5 м/с. Время прохождения полного контура — 8,9 с. Отклонение от линии достигало до 2,9 см в районе фокусов эллипса, что свидетельствует о низкой точности управления.

С помощью автоматической настройки встроенного инструмента PID Tuner позволило численно идентифицировать передаточную функцию объекта. Полученные коэффициенты обеспечили движение при скорости до 0,45 м/с; после корректировки вручную удалось добиться движения при 0,6 м/с, но с заметными рывками, а при 1 м/с система оказалась неустойчивой. Среднее время прохождения составило 8,26 с. Стандартное отклонение — $\pm 0,37$ с, коэффициент вариации — 4,5 %. Наилучший результат — 7,85 с, наихудший — 8,78 с [1–А].

Результаты показали, что классические методы не обеспечивают требуемого качества управления при высокой скорости и сложной траектории, что обосновало переход к современным методам оптимизации [1–А].

Этап 2: Настройка ПИД-регулятора с использованием генетического алгоритма для движения по эллипсу

Для настройки параметров системы управления роботом применяется ГА, который позволяет находить субоптимальные значения коэффициентов регулятора, обеспечивающие точность и устойчивость движения робота.

Для преодоления ограничений классических методов была предложена целевая функция, направленная на минимизацию ошибки слежения за эллиптической траекторией (рисунок 1):

$$F_{GA} = \frac{E}{L} \rightarrow \min, \quad \text{где} \quad E = \sum_{i=1}^n e_i^2, \quad L = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2},$$

e_i — ошибка рассогласования между текущим расстоянием от центра эллипса до робота и радиусом эллипса в том же направлении, L — пройденный путь, (x_i, y_i) — координаты робота на i -м шаге. Ошибка e_i ограничена допустимым отклонением, которое не превышает 0,3 м.

Ошибка e_i вычисляется как

$$e_i = \left| \sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2} - r_i \right|, \quad (2)$$

где (x_c, y_c) — центр эллипса, $(x_r^{(i)}, y_r^{(i)})$ — координаты на эллиптической кривой, r_i — радиус-вектор эллипса в направлении φ_i определяется следующими формулами:

$$r_i = \frac{ab}{\sqrt{b^2 \cos^2 \varphi_i + a^2 \sin^2 \varphi_i}}, \quad \varphi_i = \text{atan2}(y_i - y_c, x_i - x_c).$$

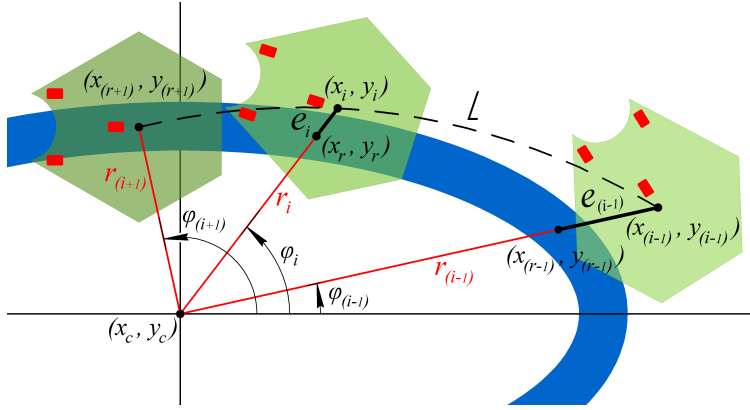


Рисунок 1 — Геометрическое представление целевой функции для генетического алгоритма

Оптимизация проводилась со следующими операторами: арифметический кроссоверинг, гауссова мутация, стохастическая селекция и элитизм.

Найдено 5 устойчивых решений, обеспечивающих движение со скоростью 1 м/с по эллипсу. Среднее время прохождения

составило 5,6 с. Стандартное отклонение — $\pm 0,35$ с, коэффициент вариации — 6,3 %. Наилучший результат — 5,2 с, наихудший — 6,1 с.

Эксперименты показали, что при 25 итерациях и размере популяции 50 достигается стабильное движение робота, тогда как увеличение числа итераций до 75 и размера популяции до 70 приводит к ухудшению качества управления, что указывает на риск застревания в локальных экстремумах или переобучения.

Этап 3: Настройка ПИД-регулятора с использованием обучения с подкреплением для движения по эллипсу

RL позволяет агенту самостоятельно адаптироваться к среде через взаимодействие с ней. В данном подходе робот рассматривается как агент — автономная система, которая на каждом шаге принимает решение о следующем действии на основе текущего состояния окружающей среды. Средой выступает виртуальное пространство, в котором робот перемещается, включая траекторию движения, динамические помехи и данные сенсоров.

Для повышения адаптивности и скорости сходимости был применен алгоритм TD3 (Twin Delayed DDPG). Обучение осуществлялось в среде ЦД где агент (робот) взаимодействует со средой, получая состояние и формируя действия в виде корректировки коэффициентов ПИД-регулятора.

Для обучения агента следованию по эталонной траектории разработана функция мгновенного вознаграждения, учитывающая два критерия: расстояние e_i от центра робота до соответствующей точки на

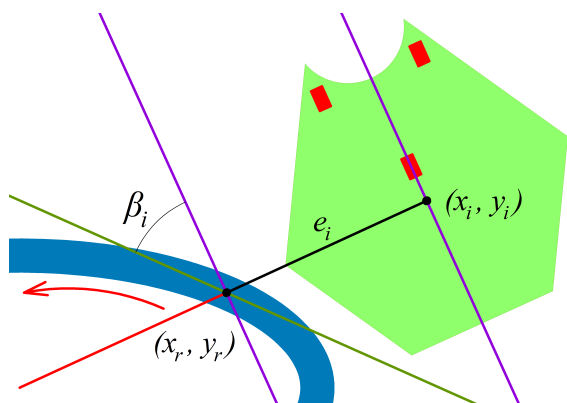


Рисунок 2 — Геометрическая интерпретация функции вознаграждения при обучении следованию по эллиптической кривой

только минимизировать отклонение робота, но и контролировать ориентацию робота вдоль траектории, что существенно снизило амплитуду колебаний при движении.

Функция мгновенного вознаграждения определяется как

$$R_{\text{line}_i} = -(g_1 \cdot e_i^{\text{norm}} + g_2 \cdot \beta_i^{\text{norm}}),$$

где i — дискретного шага времени, g_i — весовые коэффициенты, подобранные экспериментально. Чем меньше значения e_i и β_i , тем выше награда, получаемая агентом, что стимулирует более точное и плавное следование по траектории.

Было проведено десять успешных циклов обучения агента с использованием алгоритма TD3, каждый из которых включал в среднем 700 эпизодов. Все запуски завершились получением устойчивых решений, обеспечивающих движение робота по эллиптической траектории со скоростью 1 м/с без схода с линии. Среднее время прохождения — 5,22 с, стандартное отклонение — $\pm 0,27$ с, коэффициент вариации — 5,2 %. Наилучший результат — 4,9 с, наихудший — 5,6 с.

Несмотря на несколько более высокий коэффициент вариации по сравнению с ГА, алгоритм TD3 превосходит его по среднему времени прохождения на 19 % и по времени настройки — на 4 часа (2 часа против 6 часов у ГА). Кроме того, все запуски TD3 были успешными (100 % эффективность), что делает этот метод более предпочтительным с точки зрения надежности и практического применения.

В результате исследования разработан новый подход к решению задач адаптивного управления роботом, обладающий универсальностью в применении к различным сценариям функционирования. Разработанный метод позволил преодолеть ограничения традиционных методов и обеспечил повышение эффективности за счет гибкого взаимодействия компонентов систем при отслеживании криволинейной траектории в условиях нелинейной динамики робота.

эллипсе и угол β_i между направлением движения робота и касательной к траектории в данной точке (рисунок 2).

Для устранения несопоставимости размерностей (метры против радиан) компоненты нормализованы к диапазону $[0,1]$: $e_i^{\text{norm}} = \frac{0,3}{e_i}$, где 0,3 допустимый порог отклонения; $\beta_i^{\text{norm}} = \frac{\pi}{2} |\beta_i|$, где $\frac{\pi}{2}$ - критическое угловое отклонение. Это позволило не

Полученные субоптимальные параметры без дополнительной настройки протестированы на тестовых траекториях: окружности радиусом 1 м, квадрате со стороной 2 м и трассе со сложным маршрутом. Скорость движения на них – 1 м/с. На эллипсе с полуосями 1 м и 0,25 м скорость составила 0,8 м/с.

Основные положения и результаты, изложенные в данной главе, опубликованы работах [1–А - 3–А, 10–А, 12–А, 15–А, 16–А, 19–А, 20–А].

В третьей главе решается задача автономной навигации в условиях недостаточной априорной информации — на примере выхода из лабиринта. В качестве базовых подходов рассмотрены классический алгоритм Q-learning, реализующий табличное RL в дискретной сеточной среде, и алгоритм Актор–Критик, представляющий собой глубокое RL с непрерывным пространством действий. Оба метода показали ограниченную эффективность: Q-learning требует полного переобучения при изменении конфигурации лабиринта (4000 эпизодов), а Актор–Критик, хотя и допускает обобщение, формирует траекторию с большими отклонениями от центра коридора (0,29 м) и медленно сходится (5200 эпизодов).

Для преодоления указанных ограничений разработана модель обучающей системы Эксперт–Ученик, объединяющая принципы подражательного обучения и RL на основе алгоритма Soft Actor-Critic (SAC). Система включает двух агентов: Агента-Эксперта, следующего правилу правой руки и выступающего в роли ориентира для обучения; и Агента-Ученика, оснащенного лидаром и нейросетевой политикой, который обучается на основе копирования паттернов поведения Эксперта в условиях неопределенности на примере задачи навигации в лабиринте. Обучение осуществляется через механизм обратной связи по положению и скорости между агентами.

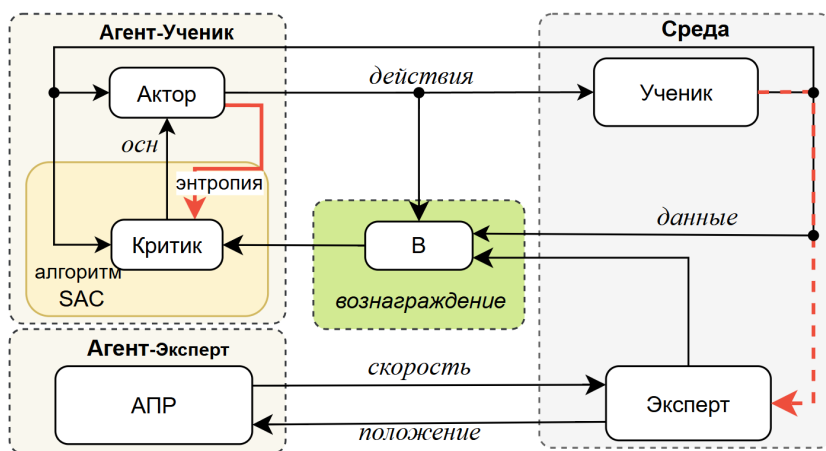


Рисунок 3 — Схема разработанной модель для обучающей системы «Эксперт–Ученик»

На рисунке 3 представлена схема взаимодействия агентов в разработанной обучающей системе. Агент-Эксперт реализует алгоритм правой руки и выступает в роли ориентира. Агент-Ученик, оснащенный нейросетевой системой управления,

сенсорные данные в непрерывные управляющие сигналы привода. Оба агента взаимодействуют с окружением, получая информацию о своем местоположении и направлении движения. Ученик дополнительно получает данные о расстоянии до Эксперта, а Эксперт, в свою очередь, регулирует свою скорость на основе сигнала от Ученика — это обеспечивает согласованность их движения.

Для устранения несопоставимости физических размерностей (метры, радианы, безразмерные флаги) все компоненты функции мгновенного вознаграждения нормализованы к диапазону $[0, 1]$.

Разработана функция мгновенного вознаграждения в виде взвешенной суммы компонентов поощрения (R_{positive}) и штрафов (R_{negative}):

$$R_{\text{agent}_t} = \underbrace{g_1 \cdot \text{dist}^{\text{norm}} + g_2 \cdot \text{lid}_{\text{rot}}^{\text{norm}} + g_3 \cdot v^{\text{norm}} + g_4 \cdot w^{\text{norm}} + g_5 \cdot \text{imp}^{\text{norm}} + g_6 \cdot r_{\text{fin}}^{\text{norm}}}_{R_{\text{positive}}} + \underbrace{g_7 \cdot \Delta\theta_{\text{exp}}^{\text{norm}} + g_8 \cdot C^{\text{norm}} + g_9 \cdot r_{\text{stop}}^{\text{norm}}}_{R_{\text{negative}}}, \quad (3)$$

где t – текущий дискретный шаг времени; нормализованные компоненты: $\text{dist}^{\text{norm}}$ – пройденное расстояние, $\text{lid}_{\text{rot}}^{\text{norm}}$ – коррекция траектории при поворотах на основе данных лидара, v^{norm} , w^{norm} – линейная и угловая скорости, imp^{norm} – компонент реакции на тупики, $r_{\text{fin}}^{\text{norm}}$ – флаг завершения пути, $\Delta\theta_{\text{exp}}^{\text{norm}}$ – угловое отклонение от направления Эксперта, C^{norm} – расстояние до Эксперта, $r_{\text{stop}}^{\text{norm}}$ – флаг преждевременного завершения эпизода, g_i – весовые коэффициенты.

Формализованы четкие критерии завершения эпизода ($r_{\text{stop}}^{\text{norm}}$), включающие достижение выхода, столкновение, остановку и превышение допустимого расстояния между агентами, что обеспечило стабильность и контролируемость процесса обучения.

Для обоснования выбора компонентов функции и их весовых коэффициентов проведен анализ чувствительности и частичное исключение ее отдельных компонентов. В ходе серии экспериментов коэффициенты g_i последовательно изменялись или соответствующие компоненты удалялись. Оценка выполнялась по следующим метрикам: время прохождения лабиринта, успешность завершения эпизода, среднее отклонение от центра коридора и стабильность сходимости политики. Установлено, что исключение штрафа за увеличение расстояния до Эксперта (C^{norm}) приводит к потере синхронизации между агентами: Ученик начинает отставать, теряет визуальный контакт с Экспертом и чаще попадает в зоны риска, что увеличивает вероятность столкновений. В результате успешность прохождения снижается с 98% до 72%. Аналогично, уменьшение веса (g_7) приводит к снижению точности следования эталонной траектории — среднее отклонение от центра коридора возрастает с 0,11 м до 0,28 м. Отключение компоненты imp^{norm} , отвечающего за

реакцию модели на прохождение роботом тупиков, существенно ухудшает поведение в замкнутых участках: агент не может своевременно распознать тупик и не выполняет разворот, что приводит к заикливаю. Наилучшие результаты были получены при следующих значениях весов: $g_4 = 0,0015$, $g_5 = 0,3$, $g_6 = 10$, $g_7 = 0,8$, $g_9 = 1,5$, были подобраны эмпирически и подтверждены устойчивостью сходимости по серии из 10 запусков. Полученная структура функции (формула 3) формирует предпочтения агента в пользу желаемого поведения, что обеспечивает удержание центра коридора и плавность маневров при следовании за Экспертом.

Предложенная функция вознаграждения стимулировала Агента-Ученика к удержанию положения в центре коридора, выполнению поворотов и разворотов при прохождении лабиринта, а также к избеганию столкновений с препятствиями.

Эксперименты показали превосходство предложенной модели над классическими методами. Модель «Эксперт–Ученик» достигла стабильной политики уже к 2500 эпизодам, что связано с эффективным использованием экспертных паттернов поведения и непрерывной обратной связью по положению и скорости. После завершения обучения среднее время прохождения лабиринта составило 256 секунд предугадывая тупики и оптимизируя траекторию, сокращая время прохождения до 256 секунд (рисунок 4а) (против 315 у Актора-Критика и 387 у Q-learning на той же карте). Важно, что Ученик продемонстрировал высокую точность следования предполагаемой оптимальной траектории, поддерживая среднее отклонение от центра коридора на уровне всего 0,11 м, что свидетельствует о качественном воспроизведении эталонного поведения.

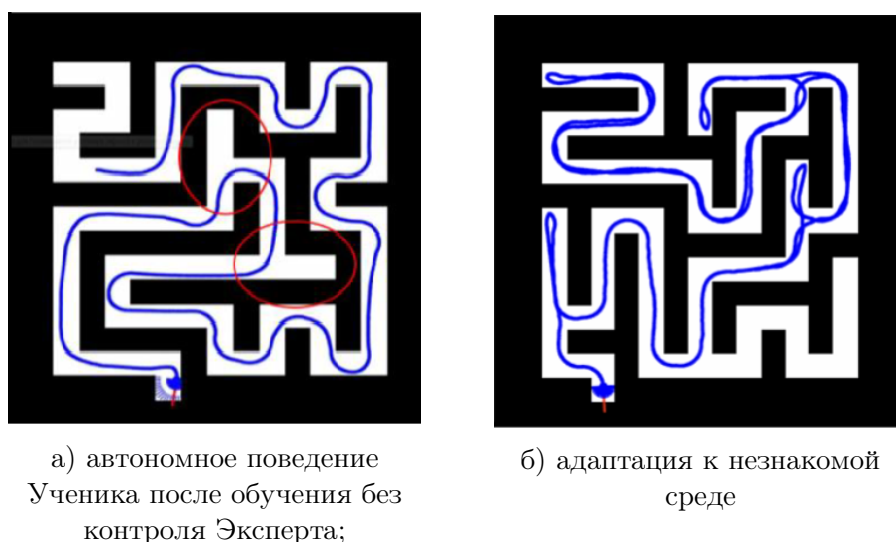


Рисунок 4 — Результат работы модели

Верификация на новой, ранее неизвестной карте показала, что модель «Эксперт–Ученик» успешно обобщает знания: успешность прохождения

составила 94%, при этом среднее время — 278 секунд, что лишь незначительно превышает результат на обученной карте (рисунок 46).

В то же время Q-learning на новой карте не достиг цели ни в одном из 10 тестовых запусков без переобучения, а Актор-Критик справился лишь в 60% случаев со средним отклонением от центра 0,34 м. Таким образом, разработанная модель не только сокращает время обучения и повышает эффективность навигации, но и обеспечивает устойчивое, предсказуемое и обобщающееся поведение, необходимое для автономной эксплуатации робота.

Основные результаты, представленные в данной главе, опубликованы в работах [4–А, 18–А, 21–А].

В четвертой главе представлена технология создания ЦДов мобильных роботов для адаптивного управления и настройки параметров конструкции и алгоритмов. Технология основана на имитационном моделировании кинематических и динамических характеристик в среде MATLAB/Simulink с интеграцией САД-моделей. Разработанная технология включает унифицированные блоки: имитационную модель, сенсорную систему, внешнюю среду и оптимизацию, объединенные в единую информационную архитектуру, что позволяет гибко настраивать модели под различные типы робототехнических систем — от колесных платформ до антропоморфных роботов (рисунок 5).

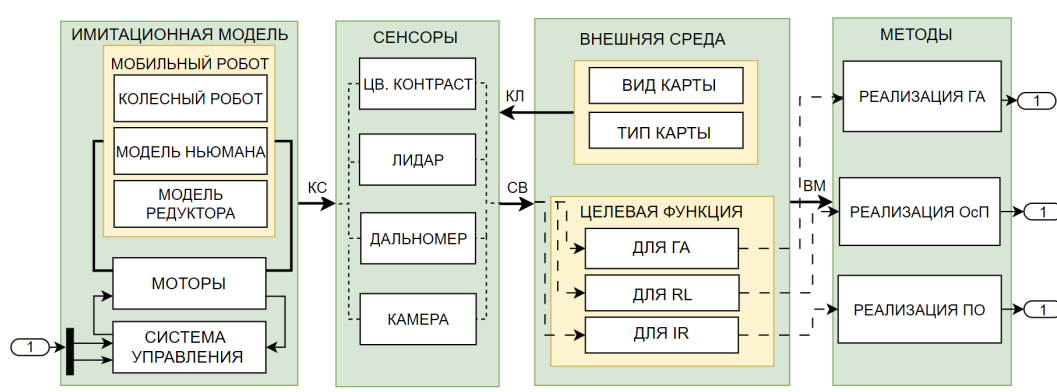


Рисунок 5 — Технология управления роботом на основе цифрового двойника

Реализован графический интерфейс, обеспечивающий визуальную настройку конфигурации на примере человекоподобного робота и параметров его кинематических звеньев в допустимых физических пределах. Через унифицированные блоки цифрового двойника — имитационную модель (масса, инерция, ограничения суставов), сенсорную систему (выбор и размещение датчиков), внешнюю среду (тип поверхности, препятствия) и блок оптимизации (функции вознаграждения) — можно безопасно исследовать влияние конструктивных и алгоритмических параметров на поведение робота в виртуальной среде, исключая риски повреждения физического прототипа при отладке управляющих

алгоритмов. Подход обеспечивает сквозной цикл проектирования — от виртуального прототипирования цифрового двойника до генерации исполняемого кода для аппаратной платформы Arduino Mega.

Практическая реализация проведена на физическом мобильном роботе с дифференциальным приводом в условиях, максимально приближенных к смоделированным в цифровом двойнике. Тестирование включало движение по замкнутым траекториям (эллипс, окружность, маршрут со сложной карте) при различных уровнях освещенности. Результаты подтвердили высокую точность отслеживания линии, стабильность движения и устойчивость системы к резким изменениям внешних условий.

Таким образом, реализована полная цепочка цифрового двойника мобильного робота до физического робота, подтверждающая работоспособность и практическую применимость разработанной технологии.

Основные результаты, представленные в данной главе, опубликованы в работах [5–А-9–А, 11–А, 13–А, 14–А, 17–А, 22–А-27–А].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана методика форсированного управления транспортными роботами на логистических складах, предусматривающая построение системы управления маневрами, направленной на минимизацию времени прохождения отдельных участков маршрута. Управление включает прямолинейное движение и разворот на месте в двух режимах — с достижением максимальной скорости и без него — при допущении равноускоренного характера движения робота. Дополнительным результатом является возможность прогнозирования времени и места потенциальных столкновений при масштабировании на группу роботов, что позволяет учитывать эти данные для эффективного управления [3–А].

2. Предложен метод автоматической настройки ПИД-регулятора для мобильного робота RoboCake при движении по замкнутой цветоконтрастной линии со скоростью 1 м/с. Метод основан на применении ГА, который позволил найти устойчивые наборы параметров, минимизирующие целевую функцию; и обучение с подкреплением — обеспечило дальнейшее улучшение качества регулирования за счет учета угловой ошибки и адаптации к особенностям траектории и позволило сократить время прохождения дистанции до 4,9 с, что на 19% быстрее, чем при использовании ГА, при этом время обучения сократилось на 2 часа [1–А, 2–А, 12–А, 15–А, 16–А, 20–А].

3. Разработана и верифицирована модель для обучающей системы «Эксперт–Ученик» для задачи автономной навигации мобильного

робота в условиях недостаточной априорной информации. Система объединяет Агента-Эксперта, следующего правилу правой руки, и Агента-Ученика с нейросетевой политикой, который обучается копировать паттерны поведения Эксперта — удержание центра коридора, плавные повороты, адаптацию скорости — через механизм обратных связей по положению и скорости. Предложенная архитектура обеспечивает не только эффективное обучение на основе подражания, но и способность к обобщению: после обучения на одной карте Ученик успешно навигирует в ранее неизвестных лабиринтах с успешностью до 94%. Эксперименты показали, что модель достигает стабильной политики уже к 2500 эпизодам, сокращает время прохождения до 256 секунд и минимизирует отклонение от центра коридора (0,11 м), превосходя классические методы Q-learning и Актор-Критик по скорости обучения, качеству траектории и устойчивости к изменениям среды. Полученные результаты демонстрируют эффективность подхода, и имеют практическую значимость для развития автономных робототехнических систем, ЦД и мобильных платформ, функционирующих в динамических условиях [4-А, 18-А, 21-А].

4. Разработана новая технология создания ЦД с возможностью адаптивного управления, основанная на имитационном моделировании и системы управления. Технология обеспечила точное воспроизведение поведения робота в реальном времени с учетом изменяющихся условий среды. В ее основе — адаптивная система управления, объединяющая алгоритмы и методы, направленные на многократное и точное воспроизведение технологического процесса. Это позволило проводить эффективную отладку и верификацию алгоритмов управления перед их переносом на физическое устройство [5-А-9-А, 11-А, 13-А, 14-А, 17-А, 22-А-27-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Практическая значимость результатов подтверждена их внедрением в образовательный процесс на факультетах БГУ (Минск) в 2023, 2025 гг. и УФТУИТ (Узбекистан) в 2023 г, а также в IT Park Xorezm (Узбекистан) в 2023 г. В 2025 г. разработанное аппаратно-программное обеспечение используется в РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации и сельского хозяйства», где внедрение алгоритма настройки адаптивного ПИД-регулятора в системе управления нижнего уровня позволило повысить точность движения и устойчивость платформы без необходимости физического тестирования.

Разработанные методы и технология вносят вклад в развитие областей робототехники, искусственного интеллекта и ЦД, обеспечивая создание более адаптивных, эффективных и надежных автономных систем.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1–А. 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.

2–А. 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. — Cham : Springer, 2022. — Т. 1562. — P. 234–244.

3–А. Ким, Т. Ю. Форсированное управление движением мобильного робота / Т. Ю. Ким, Г. А. Прокопович, А. А. Лобатый // Информатика. — 2022. — Т. 19, № 3. — С. 86–100.

4–А. 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.

5–А. 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. 103–111.

6–А. Ким, Т. Ю. Разработка целевой функции генетического алгоритма для оптимизации массы деталей редуктора при FDM-печати / Т. Ю. Ким, А. В. Печковская, Е. И. Печковский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. — 2024. — С. 16–23.

7–А. Ким, Т. Ю. Технология создания цифровых двойников для оптимизации конструктивных параметров роботов и их систем управления / Т. Ю. Ким, Г. А. Прокопович // Цифровая трансформация. Технические науки. — 2025. — Т. 31, № 3. — С. 43–53.

Статьи в сборниках научных трудов, материалов конференций и семинаров

8–А. Ким, Т. Ю. Разработка цифрового двойника для автоматической генерации траектории движения с применением глубокого обучения / Т. Ю. Ким, Г. А. Прокопович // ЛОМОНОСОВ-2020 : материалы XXVII

Междунар. молодеж. науч. форума, Москва, 10-27 нояб. 2020 г. / МАКС Пресс ; редкол.: И. А. Алешковский [и др.]. — Москва, 2020. — С. 1–2.

9–А. Ким, Т. Ю. Цифровой двойник транспортной тележки с дифференциальным приводом для отладки алгоритма следования по траектории / Т. Ю. Ким, Г. А. Прокопович // Наука и инновации : сб. науч. тр. Международной научной онлайн конференции, 26 нояб. 2020 г., г. Ташкент : в 2 ч. / Министерство инновационного развития Республики Узбекистан, Центр передовых технологий ; – Ташкент : Инновацион ривожланиш нашриёт-матбаа уйи. – Ташкент, 2021. – Ч. 2. — С. 496–499.

10–А. Ким, Т. Ю. Имитационное моделирование движения двухколесного робота roboSake на горизонтальной плоскости / Т. Ю. Ким, Г. А. Прокопович // Молодежь в науке – 2020 : тез. докл. XVII Междунар. науч. конф. молодых ученых, Минск, 22–25 сент. 2020 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Совет молодых ученых ; редкол.: В. Г. Гусаков [и др.]. – Мн. : Беларус. навука, 2020. — С. 398–400.

11–А. Ким, Т. Ю. Применение технологий цифровых двойников в образовательном процессе для студентов технической направленности / Т. Ю. Ким, Г. А. Прокопович // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2021) : тр. конф. X всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Санкт-Петербург, 20-22 окт. 2021 г. / АО «ЦТСС» ; редкол.: А.М. Плотников [и др.]. — СПб, 2021. — С. 208–213.

12–А. Kim, T. Employing of RL technology to develop an adaptive motion controller for a line follower robot / T. Yu. Kim, R. A. Prakapovich // Artificial intelligence: facing the challenges : proc. of the 15th International conf. on pattern recognition and information processing (PRIP 2021), Minsk, 21-24 Sept. 2021 / UIIP, BSUIR; — Minsk, 2021. — P. 159–163.

13–А. Ким, Т. Ю. Разработка цифрового двойника мобильного робота для исследовательских и учебных целей на базе MATLAB/SIMULINK / Т. Ю. Ким, Г. А. Прокопович // Молодежь в науке – 2021 : тез. докл. XVIII Междунар. науч. конф. молодых ученых, 21–24 сент. 2021 г., г. Минск : в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларуси, Совет молодых ученых ; редкол.: В. Г. Гусаков [и др.]. – Мн. : Беларус. навука, 2021. – Ч. 2. — С. 580–584.

14–А. Ким, Т. Ю. Разработка цифрового двойника антропоморфного робота «астронавт» с применением метода обучения с подкреплением в режиме реального времени // Молодежь в науке – 2022 : тез. докл. XIX Междунар. науч. конф. молодых ученых, Минск, 25–28 окт. 2022 г. /

Нац. акад. наук Беларуси, Совет молодых ученых ; редкол.: В. Г. Гусаков [и др.]. – Мн. : Беларус. навука, 2022. – С. 419–422.

15–А. Ким, Т. Ю. Разработка системы управления движения математической модели мобильного робота по заранее известным координатам // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : тез. докл. X Международная научно-техническая конференция, Минск, 6 апр. 2022 г. / БНТУ ; – Мн., 2022. – С. 47–48.

16–А. Ким, Т. Ю. Применение алгоритма DDPG обучения с подкреплением для мобильного робота // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2022) : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21–22 апр. 2022 г. / Белорусский государственный университет ; редкол.: В. В. Скакун [и др.] – Мн., 2022. – С. 41–44.

17–А. Ким, Т. Ю. Автоматизированная система оптимизации проектирования роботизированных логистических производств / В. А. Сычѳв, Г. А. Прокопович, Т. Ю. Ким // Информационные технологии, сети и телекоммуникации ITN&T-2023 : сб. науч. ст. и тез. международной научно-практической конференции, Ургенч, 5–6 мая 2023 г. / Ургенчский филиал ТУИТ. – Ургенч, Узбекистан, 2023. – С. 192–194.

18–А. Ким, Т. Ю. Обучение мобильного робота передвижению в неизвестной среде с применением метода обучения с подкреплением / Т. Ю. Ким // Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере : 12-я Международная научно-техническая конференция, Минск, 21–22 сент. 2023 г. / ОИПИ НАН Беларуси ; редкол.: А. В. Тузиков [и др.]. – Мн., 2023. – С. 78–81.

19–А. Ким, Т. Ю. Системы технического зрения в сельскохозяйственной технике / В. А. Сычѳв, Г. А. Прокопович, Т. Ю. Ким // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. науч. ст. 7-я Международная научно-практическая конференция, 17 нояб. 2023 г., г. Гомель : в 2 ч. / Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш». – Гомель, 2023. – Ч. 1. – С. 37–39.

20–А. Research on autonomous lift control method of hovercraft based on DDPG / Yuanhui Wang, Ziqi Qin, T. Kim [et al.]. // Artificial intelligence in Belarus : proc. of the III forum of IT-akademgrad, Minsk, 10–11 Okt. 2024 / UIIP NAS Belarus ; ed.: S. V. Kruglikov [et al.]. – Minsk, 2024. – P. 336–347.

21–А. 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) : эл. сб. ст. III международной научно-практической конференции, Полоцк, 29 марта 2024 г. / Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой ; — Новополоцк, 2024. — С. 93—97.

22–А. Ким, Т. Ю. Применение генетических алгоритмов для оптимизации компонентов редуктора при изготовлении с помощью трехмерной печати / Т. Ю. Ким, Е. И. Печковский, А. В. Печковская // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2024) : материалы III международной научно-практической конференции, Минск, 25–26 апр. 2024 г. / редкол.: В. В. Скакун [и др.], Белорусский государственный университет ; — Мн., 2024. — С. 60–63.

23–А. Ким, Т. Ю. Система управления автономной роботизированной платформой для внесения удобрений в автоматическом режиме / Т. Ю. Ким, В. А. Сычѳв, В. В. Голдыбан // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе — сегодня и завтра : сб. науч. ст. 8-я Международная научно-практическая конференция, 15 нояб. 2024 г., г. Гомель : в 2 ч. / Научно-технический центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш». — Гомель, 2024. — Ч. 2. — С. 9—11.

24–А. Robotic platform for autonomous application of pesticide / V. V. Azarenko, V. P. Selivanova, D. I. Komlach [et al.] // Agriculture digitalization and organic production : proc. of the V Intern. conf. (ADOP 2025), Barnaul, Altai Region, 3–6 June, 2025; / ed.: A. Ponzhin, V. Kundius, V. Surovtsev. — Cham : Springer, 2026. Т. 453. — Р. 101—112.

25–А. Kim, T. Control of an anthropomorphic walking robot using reinforcement learning // Embedding the future : proc. of the 17th Intern. conf. on pattern recognition and information processing, Minsk, 16–18 Sept. 2025. — Minsk : UIIP NASB, 2025. — Р. 147—151.

26–А. Ким, Т. Ю. Интеграция цифровых двойников и методов интеллектуальной оптимизации поведения для управления роботизированными системами / Т. Ю. Ким // Искусственный интеллект в Беларуси : докл. IV Междунар. форума IT-Академграда, Минск, 13–14 окт. 2025 г. / ОИПИ НАН Беларуси ; редкол.: С. В. Кругликов [и др.] — Мн., 2025. — С. 192—199.

27–А. Ким, Т. Ю. Применение технологии создания цифрового двойника для адаптивного управления антропоморфным роботом / Т. Ю. Ким // Информационные системы и технологии (CSIST'2025) : материалы XI Междунар. науч. конгр. по информатике, 29–31 окт. 2025 г., г. Минск : в 2 ч. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: С. В. Абламейко (гл. ред.) [и др.]. — Мн., 2025. — Ч. 2. — С. 257—262.

РЭЗІЮМЭ

Кім Таццяна Юр'еўна

Тэхналогія стварэння лічбавых двайнікоў мабільных робатаў для аптымізацыі элементаў сістэм кіравання

Ключавыя словы: лічбавы двайнік, мабільны робат, навучанне з падмацаваннем, генетычны алгарытм, імітацыйнае мадэляванне.

Мэта работы: распрацоўка тэхналогіі стварэння лічбавых двайнікоў мабільных робатаў для аптымізацыі элементаў сістэм кіравання.

Метады даследавання: параўнальны аналіз праграмных платформ, метадыка форсіраванага кіравання рухам МР, наладка каэфіцыентаў ПД-рэгулятара сістэмы кіравання, эвалюцыйныя метады навучання, лічбавы двайнік для верыфікацыі распрацаваных алгарытмаў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна:

метадыка форсіраванага кіравання рухам транспартных мабільных робатаў у лагістычных складах, заснаваная на класіфікацыі траекторый і вызначэнні гранічных параметраў руху, што забяспечвае мінімальны час маршруту пры адсутнасці сутыкненняў;

метады аўтанастройкі ПД-рэгулятара ЛД (лічбавага двайніка) мабільнага робата для руху па колеракантраснай лініі, заснаваны на прымяненні ГА і навучання з падмацаваннем, выкарыстоўвае крытэрыі якасці адхілення цэнтры мас і вугла восі да датычнай з улікам кінематычных і дынамічных параметраў, што дазваляе скараціць час настройкі без фізічных запускаў;

мадэль для навучальнай сістэмы «Эксперт-Вучань» выкарыстоўвае каналы зваротнай сувязі па хуткасці і становішчы, дазваляючы робату адаптавацца і капіяваць навігацыйныя навыкі ў невядомаму асяроддзі;

тэхналогія лічбавых двайнікоў мабільных робатаў на аснове інтэграцыі імітацыйнай мадэлі і адаптыўнага кіравання, якая забяспечвае істотнае скарачэнне часу прататыпавання і спрашчае ўкараненне сучасных метадаў адаптыўнага кіравання.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: Прапанаваныя метады асабліва актуальныя для задач кіравання мабільнымі робатамі ў лагістыцы, прамысловасці і медыцыне.

Вобласць прымянення: аптымізацыя руху транспартных робатаў у лагістыцы, аўтаматызацыя вытворчых працэсаў, кіраванне робатамі-асістэнтамі ў медыцыне.

РЕЗЮМЕ

Ким Татьяна Юрьевна

Технология создания цифровых двойников мобильных роботов для оптимизации элементов систем управления

Ключевые слова: цифровой двойник, мобильный робот, обучение с подкреплением, генетический алгоритм, имитационное моделирование

Цель работы: разработка технологии создания цифровых двойников мобильных роботов для оптимизации элементов систем управления.

Методы исследования: сравнительный анализ программных платформ, методика форсированного управления движением мобильных роботов, настройка коэффициентов ПИД-регулятора системы управления, эволюционные методы обучения, цифровой двойник для верификации разработанных алгоритмов.

Полученные результаты и их новизна:

методика форсированного управления движением транспортных мобильных роботов в логистических складах, основанная на классификации траекторий и определении предельных параметров движения, что обеспечивает минимальное время маршрута при отсутствии столкновений;

метод автонастройки ПИД-регулятора ЦД мобильного робота для движения по цветоконтрастной линии, основанный на применении ГА и обучения с подкреплением, использует критерий качества отклонения центра масс и угла оси к касательной с учётом кинематических и динамических параметров, что позволяет сократить время настройки без физических запусков;

модель для обучающей системы «Эксперт-Ученик» использует каналы обратной связи по скорости и положению, позволяя роботу адаптироваться и копировать навигационные навыки в неизвестной среде;

технология цифровых двойников мобильных роботов на основе интеграции имитационной модели и адаптивного управления, обеспечивающая существенное сокращение времени прототипирования и упрощая внедрение современных методов адаптивного управления.

Рекомендации по использованию. Предложенные методы особенно актуальны для задач управления мобильными роботами в логистике, промышленности и медицине.

Область применения: оптимизация движения транспортных роботов в логистике, автоматизация производственных процессов, управления роботами-ассистентами в медицине.

SUMMARY

Kim Tatyana Yurevna

Technology for creating digital twins of mobile robots to optimize control system elements

Keywords: digital twin, mobile robot, reinforcement learning, genetic algorithm, simulation modeling.

Purpose of work: to develop a technology for creating digital twins of mobile robots aimed at optimizing elements of control systems.

Research methods: comparative analysis of software platforms, forced motion control methodology for mobile robots, PID controller coefficient tuning, evolutionary learning methods, and digital twin-based verification of developed algorithms.

The results obtained and their novelty:

A methodology for the forced motion control of transport mobile robots in logistics warehouses, based on trajectory classification and determination of limiting motion parameters, which ensures minimal route time in the absence of collisions;

A method for auto-tuning the PID controller of a mobile robot's digital twin (DT) for moving along a color-contrast line, based on the application of GAs and reinforcement learning. It uses a quality criterion for the deviation of the center of mass and the angle of the axis to the tangent, considering kinematic and dynamic parameters, which reduces setup time without physical launches;

A model for the "Expert-Apprentice" training system uses feedback channels for speed and position, allowing the robot to adapt and replicate navigation skills in an unknown environment;

A technology for digital twins of mobile robots based on the integration of a simulation model and adaptive control, which ensures a significant reduction in prototyping time and simplifies the implementation of modern adaptive control methods.

Usage Recommendations: The proposed methods are particularly relevant for mobile robot control tasks in logistics, industrial automation, and medical robotics.

Application Areas: Optimization of transport robot movement in logistics, automation of production processes, and control of assistant robots in medicine.



Подписано в печать 27.03.2026. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,6. Уч.-изд. л. 1,9.
Тираж 60 экз. Заказ 2.

Издатель и полиграфическое исполнение:
государственное научное учреждение «Объединенный институт проблем
информатики Национальной академии наук Беларуси».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/274 от 04.04.2014.
Ул. Сурганова, 6, 220012, Минск.