

На правах рукописи



**Алхалили Алак Сабах Бадри**

**Предотвращение столкновений при движении мобильного робота в среде со  
статическими и динамическими препятствиями**

2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы  
(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Волгоград - 2025

Работа выполнена на кафедре «Робототехника и мехатроника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственной технической академии».

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент,  
**Лукьянов Евгений Анатольевич.**

Официальные оппоненты: **Капустян Сергей Григорьевич,**  
доктор технических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», лаборатория «Информационные технологии и процессы управления», ведущий научный сотрудник, г. Таганрог;

**Исаев Михаил Александрович,**  
кандидат технических наук,  
общество с ограниченной ответственностью «Стилсофт», опытно-конструкторское бюро беспилотных летательных аппаратов, группа разработки программного обеспечения беспилотных летательных аппаратов, руководитель, г. Ставрополь.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону.

Защита состоится «03» июля 2025 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.282.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» по адресу: 400005, г. Волгоград, проспект им. В. И. Ленина, 28, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» и на сайте [www.vstu.ru](http://www.vstu.ru) по ссылке: <http://www.vstu.ru/upload/iblock/75a/75aed7bc7716bed26bff96006a7cfd33.pdf>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025г.

Учёный секретарь

диссертационного совета



Попов Андрей Васильевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и степень разработанности темы исследования.** Мобильные роботы осуществляют свои функции, перемещаясь в окружающем пространстве. Для этого ими решается задача планирования траекторий движения и поведения робота при различных внешних условиях. Планирование и управление движением мобильного робота (МР) — это связанные задачи, решение которых зависит от его типа, назначения, условий окружающей среды. Различным аспектам данной проблематики посвящены работы таких отечественных ученых как А. Р. Гайдук, И. А. Каляев, С. Г. Капустян, В. М. Лохин, С. В. Манько, М. Ю. Медведев, В.Б. Никишин, В. Е. Павловский, Ю. В. Подураев, В. Х. Пшихопов, Е. И. Юревич, А. С. Ющенко и другие. Следует отметить работы зарубежных ученых G. C. Avenant, K.C.Choi, С. Н. Hong, E. Hygounenc, I.Jung, В. S. Kim, S.Lacroix, A. В. Moutinho, P. Soueres. В детерминированных условиях задача планирования перемещений робота может быть решена до начала его движения. Во всех других случаях планирование траектории — это многокритериальная задача поиска последовательности допустимых перемещений МР от начального положения к целевой точке. Движение робота по запланированным ранее траекториям происходит с ошибками скоростными и траекторными, вызванными различными причинами и факторами. Информация о препятствиях, которой обладает система управления робота, является неполной и реальные параметры препятствий могут изменяться со временем. При наличии подвижных препятствий любая спроектированная ранее траектория движения может потребовать корректировки. Большинство реальных применений мобильных роботов предполагают частичную или полную неопределенность знаний о препятствиях. Можно констатировать, что не существует наилучшего решения поиска пути робота в недетерминированной среде с подвижными препятствиями, а известные алгоритмы объезда препятствий эффективны лишь в частных случаях. Поэтому разработка методов решения задач обеспечения движений мобильных наземных роботов и управления их безопасным перемещением в условиях статических и динамических препятствий на основе имеющейся информации является актуальной научно-технической задачей.

**Целью исследования** является предотвращение столкновений с препятствиями при движении МР по траектории, на основе прогнозных оценок на интервале прогнозирования и нейросетевом управлении при выполнении объезда препятствия. Для достижения целей в работе решаются следующие задачи.

1. Анализ известных методов планирования траекторий и управления движением мобильных роботов в недетерминированных условиях;
2. Разработка метода оценки вероятности столкновения на изменяемом интервале прогнозирования с учетом характерных особенностей информационного обеспечения мобильного робота;
3. Разработка метода планирования движений МР в среде со статическими и динамическими препятствиями для предотвращения столкновений и осуществления объезда препятствий;
4. Разработка дискретно-непрерывной имитационной модели движения объектов в рабочей зоне мобильного робота с учетом стохастичности параметров их движения;
5. Разработка виртуальных моделей движения МР и препятствий, параметры которых изменяются случайным образом, на основе различных методов управления движением робота.
6. Анализ эффективности разработанного метода планирования движений МР при объезде препятствий.

**Объектом исследования** являются мобильные роботы, осуществляющие траекторное движение в целевую точку в недетерминированных условиях при наличии статических и динамических препятствий.

**Предметом исследования** являются методы планирования движений МР, а также алгоритмы их реализующие, обеспечивающие объезд препятствий и предотвращение столкновений при движении робота к целевой точке.

**Методы исследования.** Работа выполнялась на основе методов и положений системного анализа, физических законов движения твердых тел, методов математического моделирования динамических и стохастических систем, методов решения навигационных задач, методов создания и применения искусственных нейронных сетей, методов и алгоритмов получения информации о внешней среде.

**Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:**

1. Разработан метод управления движениями робота, предотвращающий его столкновения при движении по траектории в среде с препятствиями, оценивающий вероятность столкновения на интервале прогнозирования и учитывающий стохастичность параметров препятствий, отличающийся тем, что прогнозирование осуществляется с учетом стохастичности параметров препятствий, а движения объезда определяются нейронной сетью на основе информации об объектах ближней зоны МР.

2. Разработано нейросетевое решение, определяющее параметры движения робота для объезда препятствий, структура которого и алгоритмы обучения с подкреплением позволяют учитывать параметры препятствий, отличающееся тем, что входными значениями нейросети являются расположение и параметры препятствий в ближней зоне МР, а выходные параметры определяют точку объезда, движение через которую позволяет предотвратить столкновение;

3. Разработан метод энтропийной регуляризации решений нейросетевого планировщика движений робота для объезда препятствия, отличающийся тем, что реализуется стохастическая коррекция положения точки объезда (выходных значений нейронной сети), а не изменение функций вознаграждения, что обеспечивает поиск наилучших решений;

4. Разработана имитационная модель движения МР в рабочей зоне с неподвижными и подвижными препятствиями, отличающаяся учетом стохастичности параметров движения препятствий и вероятностной оценкой возможных столкновений на интервале прогнозирования, а также возможностью использования одного из нескольких методов планирования поведения робота для выполнения их сравнительной оценки.

**Теоретическая значимость результатов работы:**

- Предложен метод предотвращения столкновений робота при его движении по траектории в среде с препятствиями, отличающийся использованием оценки вероятности столкновения на интервале прогнозирования и определяющий параметры движения робота для объезда препятствия на основе нейронной сети, реализующей обучение с подкреплением;
- Разработанное нейросетевое решение для определения параметров движения робота при объезде препятствия, учитывающая параметры препятствий в ближней зоне робота, отличающаяся тем, что определяет точку для безопасного объезда препятствия и позволяет выполнять накопление новых данных для обучения (до обучения) в процессе ее использования;
- Разработан метод энтропийной регуляризации решений нейросетевого планировщика движений робота для объезда препятствия, отличающийся тем, что реализуется стохастическая коррекция положения точки объезда (выходных значений нейронной сети), а не изменение функций вознаграждения, что обеспечивает поиск наилучших решений.

**Практическая значимость результатов работы:**

- Разработано нейросетевое решение, которое обеспечивает определение параметров движения робота для объезда препятствий, при этом реализуются алгоритмы обучения с подкреплением позволяют учитывать параметры препятствий.

- Создана имитационная модель движения МР в рабочей зоне с неподвижными и подвижными препятствиями, отличающаяся учетом стохастичности параметров движения препятствий и вероятностной оценкой возможных столкновений на интервале прогнозирования.
- Разработаны алгоритмы принятия решений об объезде препятствий и определения параметров движения робота для объезда препятствия, позволяющие роботу двигаться по траектории без столкновений.

**Результаты, защищаемые в диссертационной работе.** На защиту выносятся:

- метод формирования параметров движений робота при объезде препятствий, предотвращающий его столкновения при движении в среде с препятствиями, отличающийся вероятностной оценкой возможного столкновения и применения специализированной нейронной сети, определяющей траекторию объезда (параметры движения при объезде) с учетом стохастичности параметров препятствий;
- нейросетевой планировщик, определяющий параметры движения робота для объезда препятствий, структура которого и алгоритмы обучения с подкреплением позволяют учитывать параметры препятствий в ближней зоне робота, отличающийся энтропийной регуляризацией, выполняемой посредством стохастической коррекции выходных значений;
- метод энтропийной регуляризации нейросетевого планировщика движений робота для объезда препятствия, обеспечивающий нейронной сети свободу поиска наилучших решений, отличающийся тем, что реализуется стохастическая коррекция положения точки объезда (выходных значений нейронной сети), а не изменение функций вознаграждения;
- имитационная модель движения МР в рабочей зоне с неподвижными и подвижными препятствиями, отличающаяся учетом стохастичности параметров движения препятствий и вероятностной оценкой возможных столкновений на интервале прогнозирования, а также возможностью использования одного из нескольких методов планирования поведения робота для выполнения их сравнительной оценки;
- алгоритмы принятия решений об объезде препятствий и определения параметров движения робота при объезде, позволяющих двигать роботу по траектории без столкновений.

**Степень достоверности и апробация результатов работы.** Достоверность полученных в диссертационной работе результатов обусловлена применением современных методов исследований, корректными предположениями при составлении математических моделей, согласованностью результатов компьютерного моделирования движения препятствий и виртуальной имитационной моделью траекторного движения робота. Все полученные теоретические и практические результаты апробированы на международных и всероссийских конференциях. Алгоритмические решения, полученные при выполнении диссертации защищены свидетельством о регистрации программы для ЭВМ.

**Внедрение результатов диссертационных исследований.** Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Робототехника и мехатроника» Донского государственного технического университета в учебном процессе магистрантов по направлению 15.04.06 — Мехатроника и робототехника. Результаты диссертационной работы планируется использовать при разработке и создании мобильных роботов различной степени автономности на предприятии (рассматривается внедрение результатов в двух организациях, проектирующих мобильных роботов).

**Соответствие работы паспорту специальности.** Диссертационная работа соответствует научной специальности 2.5.4 «Роботы, мехатроника и робототехнические системы» в пунктах 4, 5 и 8 паспорта специальности, а именно:

4. Математическое и полунатурное моделирование мехатронных и робототехнических систем, включая взаимодействие со средой, анализ их характеристик, оптимизация и синтез по результатам моделирования.
5. Методы, алгоритмы, программные и аппаратные средства управления роботами, робототехническими и мехатронными системами, включая адаптивное, оптимальное, распределенное, интеллектуальное и супервизорное управление.
8. Планирование и реализация действий и движений, индивидуальное и групповое управление мобильными роботами наземного, воздушного, надводного, подводного, многосредного и космического применения.

**Апробация работы.** Диссертационная работа, её основные результаты обсуждались и докладывались на следующих конференциях и научных семинарах:

1. XVII международная научно-техническая конференция Динамика технических систем "ДТС-2021", Ростов-на-Дону, 09–11 сентября 2021 г.;
2. V Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы повышения эффективности научной работы в оборонно-промышленном комплексе России», Знаменск, 24–25 марта 2022 г.;
3. Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки и техники. 2021», 17–19 марта 2021 года, Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет.
4. Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки и техники. 2022», 16–18 марта 2022 года, Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет.
5. Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки и техники. 2023», 15–17 марта 2023 года, Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет.
6. Международная конференция «Ural Environmental Science Forum. Sustainable Development of Industrial Region» (UESF-2023). 31 May 2023. E3S Web of Conference.
7. VII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Исследование и проектирование интеллектуальных систем в автомобилестроении, авиастроении и машиностроении» (ISMCA – 2023), г. Таганрог, 7 апреля 2023 г.
8. Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки и техники. 2024», 19–21 марта 2024 года, Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет

**Публикации.** Материалы диссертации достаточно полно изложены в 13 публикациях, из которых 4 работы опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень рецензируемых научных изданий), и 1 работа опубликована в журнале, индексируемом в международной реферативной базе Scopus, 7 публикаций по материалам конференций; 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Основными публикациями являются работы [1-13], указанные в конце автореферата.

**Личным вклад автора в выполненных и опубликованных работах является:** анализ известных решений; постановка задач исследований; разработка математических моделей, проведение экспериментальных исследований; обработка и анализ полученных результатов; формирование выводов; составление алгоритмов для их регистрации в Роспатент, разработка структуры и алгоритмов работы нейронной сети определения параметров движения робота при объезде препятствий.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем работы составляет 198 страниц машинописного текста, содержит 59 рисунков, 19 таблиц, список литературы из 160 наименований и приложений на 25 страницах.

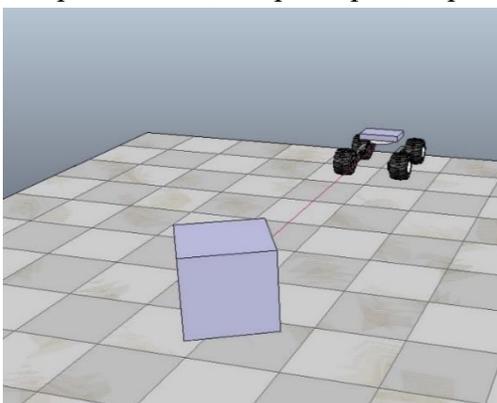
## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении.** Обоснована актуальность диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, приведена научная новизна и практическая значимость работы, представлена краткая структура диссертации, описаны защищаемые положения.

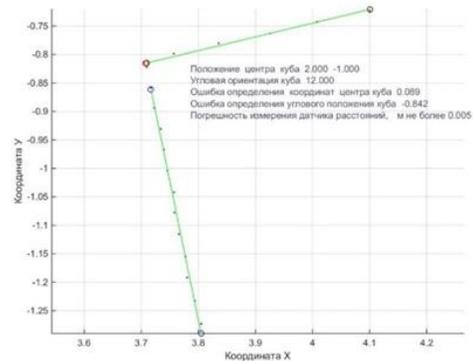
**В первой главе.** Рассмотрены принципы и методы планирования траекторий движения МР, проведен их анализ. Большое количество публикация в области управления движениями робота подтверждает, что задачи синтеза алгоритмов траекторного движения и управления мобильными роботами в недетерминированных условиях актуальны. Актуальным является разработка эффективных методов планирования движений МР в условиях динамически изменяющейся внешней среды, в том числе для избежания столкновений. Значительная часть известных алгоритмов планирования траекторий разработаны для детерминированных условий и не эффективны при наличии подвижных препятствий. В реальных условиях получение полной информации о препятствиях на этапе планирования движений невозможно. Актуальным является разработка эффективных методов планирования поведения и управления движением мобильных роботов, учитывающих возможности сенсорных систем и обеспечивающих движение без столкновений в среде со статическими и динамическими препятствиями.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы сенсорно-информационного обеспечения мобильных роботов и решения навигационных задач в плане определения расположения и ориентации препятствий в ближней зоне робота. Сделаны следующие заключения. Получение данных о параметрах объектов (препятствий), таких как их расположение, размеры, форма, направление и скорость движения, требует иногда значительного времени. Запаздывание в получении информации об объектах ближней зоны приводит к образованию ошибок, значимость которых существенно растет с увеличением скоростей движения объектов и самого робота. Точность, с которой определяются параметры объектов «внешнего мира», во многом определяет возможности МР по эффективному планированию и реализации своих движений.

Отмечено, что наиболее подробную информацию о препятствиях можно получить с помощью сканирующих систем или технического зрения, но решение навигационных задач с помощью технического зрения требует значительного времени и объема вычислений. Рассмотрена сенсорно-информационная система робота (рис.1) для решения характерных задач - обнаружения препятствия; определения расположения препятствия, его размеров; определения параметров движения препятствия.



а)



б)

Рис. 1 Схема измерения и данные измерения

Качество решения задач оценивалось с точки зрения погрешностей определения параметров. Процессы получения информации о препятствиях рассмотрены на примере использования дальнометрических датчиков. Для проверки адекватности результатов численных экспериментов, были подготовлены и проведены реальные эксперименты с использованием лидаров Delta2B, Delta2G

производства компании Zirobotix. Использовались единые алгоритмы обработки экспериментальных данных и программное обеспечение. Погрешность датчика, измеряющего расстояния принималась равной 0.5% или 1% и учитывалась в виде случайного нормально распределённого значения.

Установлено:

- Для динамических объектов погрешность оценки его расположения зависит не только от ошибок датчика и расстояния до объекта, но и от скорости и направления его движения. Например, при скоростях движения препятствия 50 мм/сек погрешности составляли 170 – 190 мм при одном направлении движения и 190 – 210 мм при движении в противоположную сторону.
- Ошибки измерения скорости препятствия и направления его движения могут достигать 20 процентов.
- Погрешности определения угловой ориентации объекта известной формы (куб) в целом являются малыми (0.2 – 3 градуса), что объясняется влиянием интерполяционного «сглаживания» ошибок измерения при нахождении аппроксимирующих уравнений.

Выводы. Использование методов сканирующих измерений для определения формы, размеров, расположения и параметров движения объектов в рабочей зоне МР является эффективным способом получения информации о препятствиях. Важным является выбор алгоритмов обработки измерительной информации, позволяющих определять границы поверхностей препятствий, построение сеточных моделей, вычисление геометрических параметров тел и параметров их движения. Увеличение скорости движения объекта ведет к увеличению погрешности определения его расположения и ориентации. В предположении о нормальном законе распределения ошибок измерения, характер результатов измерений будут иметь нормальный закон распределения. Для динамических объектов погрешности оценки вектора скорости зависят от ориентации объекта по отношению к сканирующей системе. Для движущихся препятствий ошибка определения расположения достигала 0.2/м. Ошибка определения скорости движения препятствий достигала 10-12% для «малых» скоростей и 40 – 60 % для «больших» скоростей движения. Полученные результаты и выводы подтверждают актуальность темы диссертационной работы, поскольку планирование движений МР должно выполняться с учетом актуальной информации об объектах ближней зоны. Решения об изменении траектории движения для объезда статических и динамических препятствий должны приниматься на основе данных о расположении препятствий в ближней зоне робота при учете случайного характера значений параметров препятствий и вектора их движения.

Таким образом, методы и способы получения информации о препятствиях существенным образом влияют на возможности робота двигаться без столкновений и успешно исполнять свои функции. При вычислении размеров, расположения препятствий и параметров их движения ошибки имеют случайный характер, с нормальным законом распределения. Решение задач движения к целевой точке по траекторным участкам необходимо выполнять с учетом неопределенностей и стохастичности информации, получаемой сенсорно-информационной системой робота.

**В третьей главе** рассмотрены вопросы планирования и управления движением МР по траекторным участкам к целевой точке. Рассмотрены задачи планирования перемещений МР в условиях статических и динамических препятствий, параметры движения которых могут изменяться. Рассмотрены возможные решения о действиях МР при обнаружении возможности столкновения. Типовой последовательностью событий, определяющих проблематику диссертационной работы, является следующая – движение по участку запланированной траектории, обнаружение возможности столкновения, принятие решения по изменению параметров движения для объезда, поиск параметров движения в точку объезда, движение в точку объезда, возврат на заданную траекторию движения. Для оценки изменения ситуации в ближней зоне робота на заданном интервале прогнозирования в диссертации разработан метод вероятностного прогнозирования, который является ситуативной основой разработанного метода планирования движений МР в условиях возможного столкновения. Метод реализован в предположении, что системе управления

робота доступна информация о текущих координатах препятствий в ближней зоне, скорости и направления движения препятствий, а также их размеры. Эти значения фактически являются математическими ожиданиями случайных величин, вычисляемых с некоторым интервалом времени сенсорно-информационной подсистемой робота. Предлагаемый метод прогнозирования обеспечивает оценку вероятности столкновения с препятствиями при движении робота на участке траектории. Это позволяет своевременно принимать решения об изменении параметров движения МР для предотвращения столкновений. Оценка вероятности столкновения основана на геометрической трактовке (рис. 2а), учитывая, что движения препятствий на интервалах прогнозирования могут быть представлены как детерминированные, со случайными параметрами. Прогнозная оценка вероятности столкновения МР с препятствием трактуется как задача определения пересечения в некоторый момент времени областей, формируемых профилями робота и возможного положения препятствий на интервале прогноза. При этом, границы возможного положения определяются координатами точек, для которых вероятность нахождения в них подвижных препятствий выше некоторого порога. С учетом стохастичности векторов движения препятствий зона возможного его расположения вычисляется следующим образом

$$H(\rho \leq X < \lambda) = \Phi_0\left(\frac{\lambda-a}{\sigma}\right) - \Phi_0\left(\frac{\rho-a}{\sigma}\right) \quad (1)$$

где  $H(\rho \leq X < \lambda)$  - вероятность нахождения значения в интервале,  $\Phi_0$  - значение функции Лапласа для «левой» и «правой» половины интервала возможного значения,  $\sigma$  - среднеквадратическое отклонение. Вероятность нахождения препятствия на интервале прогноза показана на рисунке 2б.

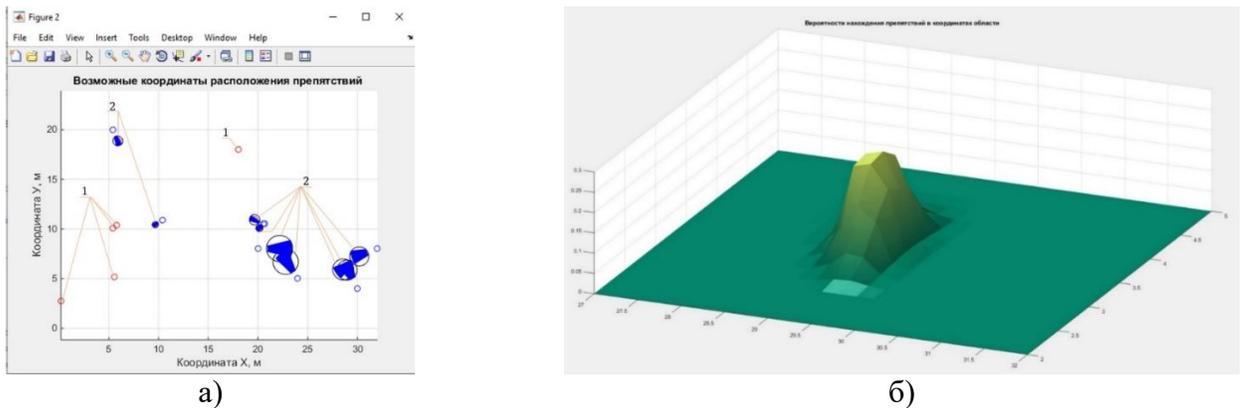


Рис. 2. Расположение препятствий на интервале прогноза. (1 – расположение неподвижных препятствий, 2 – зона вероятного нахождения подвижных препятствий)

Планирование движений МР в условиях статических и динамических препятствий, параметры которых стохастичны, на основе аналитических методов динамики движения мобильных роботов могут потребовать недопустимо большого времени вычислений. Поэтому в диссертации принято решение об использовании нейронной сети для определения параметров движения МР в условиях возможного столкновения. Для разработки нейросетевого решения задачи объезда препятствий в динамически изменяющейся среде были проанализированы известные методы применения искусственных нейронных сетей для управления движениями роботов. В диссертационной работе разрабатывается НС, использующая в качестве входной информации координаты и параметры движения препятствий в ближней зоне робота, а также параметры робота и координаты точки, куда он движется. Создание нейронной сети, использующей классические методы обучения, потребует очень большой обучающей выборки, времени ее получения и обучения. Так как в настоящее время не существует аналитического или формализованного решения,

определяющего поведения робота при любом расположении препятствий, их размерах и параметрах движения, то необходимо разработать нейросетевое решение, способное обучаться самостоятельно.

Из многообразия возможных решений, принято решение использовать алгоритмы обучения с подкреплением. Нейронная сеть на основании информации о препятствиях, получаемой с помощью сенсорной системы робота, должна определить параметры движения МР для выполнения объезда препятствия. Такое использование нейронной сети обеспечивает ее «аппаратную независимость» от конкретной конструкции робота и позволяет не дублировать решение задач управления приводами колес бортовой системой управления. После определения возможного столкновения, осуществляется обращение к нейронной сети, которая определяет направление движения робота, скорость его движения и длительность движения с этими параметрами в точку объезда. После достижения точки объезда движение робота продолжается в ту точку траектории, куда он двигался до объезда. Нейросетевое решение, разрабатываемое в диссертации, учитывает расположение не только «опасного» препятствия (статического или динамического) но и других препятствий в момент времени планирования объезда. В рамках данной работы предложен метод, комбинирующий прогнозирование перемещений и столкновений, алгоритмы оценки параметров статических и динамических препятствий и нейронную сеть, реализующую обучение с подкреплением для предотвращения столкновений и объезда препятствий. К решениям, обеспечивающих работу в пространстве непрерывных входных и выходных параметров относятся варианты нейронных сетей Актор – Критик (SAC). Обучение с подкреплением (reinforcement learning - RL) объединяет методику Актора-Критика и методы изменения стратегии принятия решений. Основной целью SAC является максимизация ожидаемой награды с учетом максимальной энтропии политики принятия решений, что позволяет находить оптимальные (квазиоптимальные) решения в стохастических условиях. Типовая схема взаимодействия сетей Актора-Критика приведена на рисунке 3. Вознаграждение является количественной мерой оценки качества результата исполнения роботом принятых нейронной сетью решений об объезде.

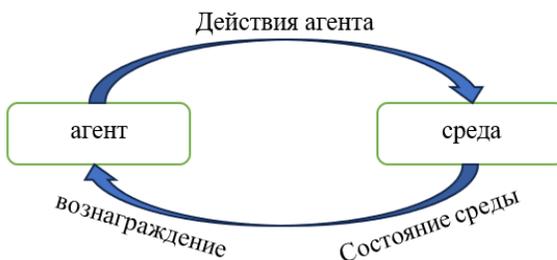


Рис. 3. Процесс взаимодействия агента со средой

В данном случае робот движется в указанном сетью направлении, с указанной скоростью и в течение заданного времени. Задачей Критика является оценка результата исполнения этих движений и формирование соответствующего вознаграждения. Поскольку эффективность реализации решений нейронной сети может быть оценена на основе вычисляемых (измеряемых) параметров, определяющих безопасность и эффективность движения робота по траектории объезда, то разрабатывать самообучающегося критика в виде нейронной сети нет необходимости. Сформируем задачи, решение которых будет выполняться с использованием нейросети Актора:

- Определение нового направления движения робота при объезде препятствия;
- Определение скорости движения робота на участке объезда;
- Определение длительности движения робота в точку объезда.

Нейронная сеть (Актор), предоставляет решения о параметрах движения в точку объезда. Движения робота с этими параметрами, если не произошло столкновение, приводит его в точку объезда. По результатам перемещения, актор должен получить соответствующее вознаграждение или штраф. Такое

взаимодействие делает возможным обучение агента принимать правильные решения в условиях, когда другие методы решения не могут быть эффективны. Обездвиживание предполагает движение МР по двум новым траекторным участкам. Первый – из текущего положения в «точку объезда» А (рис. 4), второй из точки А в точку продолжения движения по заданной траектории  $P_{n+1}$ . Вознаграждение формируется по результатам реализации этих двух перемещений. На рисунке 4.  $\alpha$  – угол изменения направления движения робота в точку объезда. На рисунке не показаны другие имеющиеся статические и динамические препятствия, вероятность столкновения с которыми на интервале прогноза отсутствует.

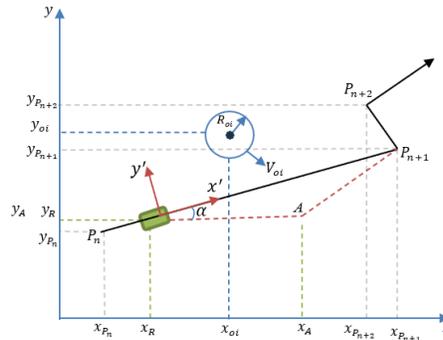


Рис 4. Действия робота для объезда препятствия (иные препятствия условно не показаны)

Алгоритм применения разрабатываемой нейронной сети в процессе обучения показан на рисунке 5.

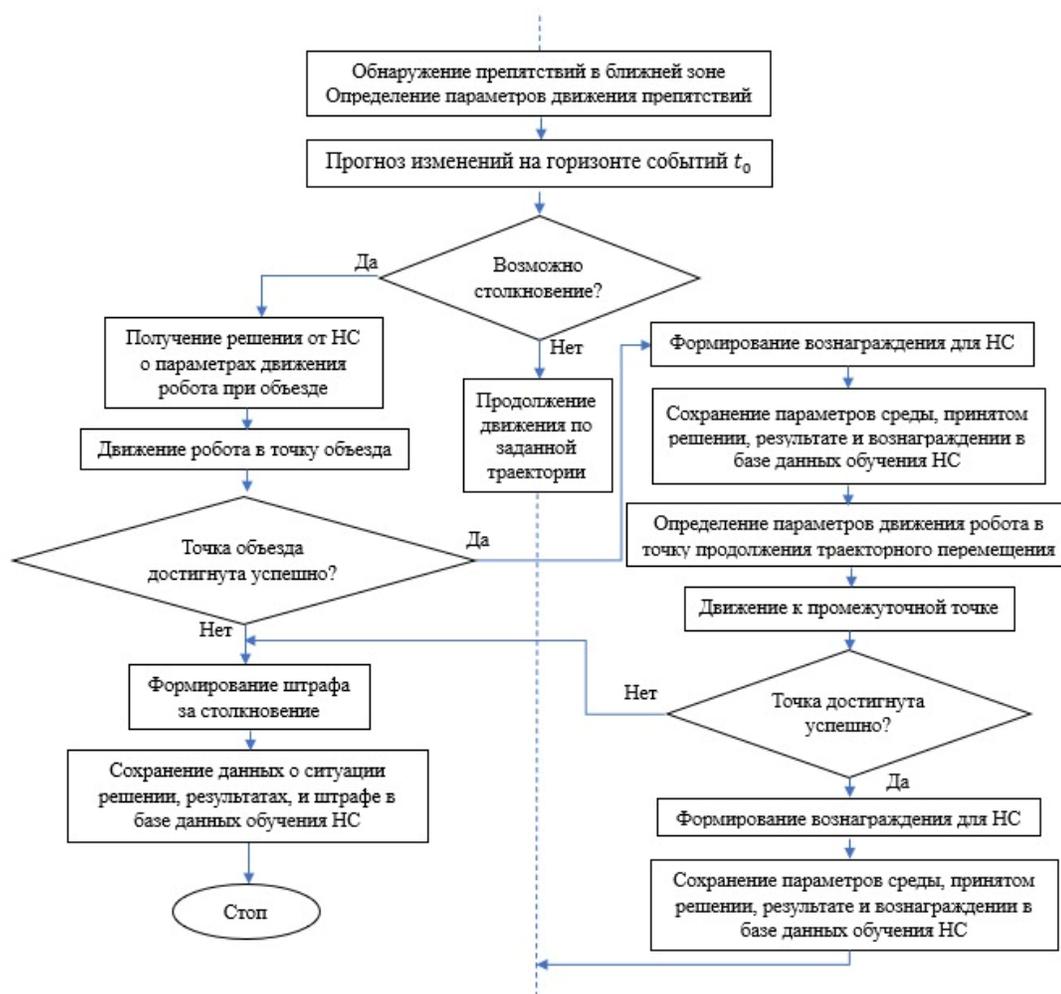


Рис. 5. Алгоритм применения нейронной сети для объезда препятствий в процессе обучения.

В системах обучения с подкреплением используются стратегии - оптимизации принятия решения, оптимизации функции вознаграждения, оптимизации функции ценности состояния, которое было достигнуто в результате совершенного действия. В этой работе под стратегией принятия решения понимается получение на выходе нейронной сети некоторого результата, зависящего от ее обучения, определяющего действия робота по объезду препятствия в каждой ситуации возможного столкновения. Фактически, стратегия принятия решения определяется в процессе обучения и формируется опытом «исследования внешнего мира» и функциями вознаграждения, которые реализуют некоторый набор правил и рекомендаций, что можно рассматривать как стратегию поведения агента.

Стратегия принятия решения — это отображение пар действие/состояние на вероятность выбора данного действия при возникновении данного состояния:

$$\pi : A \times S \rightarrow [0, 1]: \pi(a|s) \stackrel{\text{def}}{=} P(A_t = a | S_t = s) \quad (2)$$

Величина вознаграждения характеризует качество принятого решения, приведшего к изменению «состояния среды». Целью агента является максимизация полного вознаграждения  $G_t$ , полученного начиная с момента времени  $t$ :

$$G_t = R_{t_1} + \gamma R_{t_2} + \gamma^2 R_{t_3} + \dots + \sum_{k=3}^T \gamma^k R_{t_{(k+1)}} \quad (3)$$

где  $\gamma \in [0, 1]$  — фактор дисконтирования,  $T$  — конечный момент времени. Эти уравнения соответствуют «многошаговым» действиям, осуществляемым на основе решений нейронной сети, за каждое из которых начисляется вознаграждение.

В данном случае, объезд препятствия осуществляется двумя этапами – от момента  $t$  – обнаружения ситуации, требующей объезда, до момента достижения точки объезда  $t_1$ , а также от этого момента времени до момента времени  $t_2$ . Функция вознаграждения возвращает значение после исполнения каждого из этих этапов и характеризует полезность совершенных действий по объезду препятствия. Для предотвращения проблемы выбора нейросетью одних и тех же решений, введем энтропийно-регуляризованный компонент в обучение с подкреплением. Под энтропией понимаем оценку, насколько случайным был выбор действия в текущей сложившейся ситуации. При этом агент получает дополнительное бонусное вознаграждение на каждом шаге, пропорциональное энтропии принятия решения на этом шаге. Это обеспечит для НС «изучение внешнего мира» и нахождение наилучших решений. Политика в этом случае есть максимизация вероятности ожидания суммарного вознаграждения с учетом дисконтирования вознаграждения за выполненное действие и с учетом вознаграждения за энтропию решения

$$\pi^* = \arg \max_{\pi} E[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t (R(s_t, a_t, s_{t+1}) + \alpha H(\pi(\cdot | s_t)))] \quad (4)$$

где  $\alpha > 0$  - коэффициент значимости «случайности» при выборе параметров действия;

$\gamma$  – коэффициент дисконтирования.

Этапы, выполняемые для обучения нейронной сети, принимающей решения о действиях по объезду препятствия:

1. Имитационное моделирование движения робота по запланированной траектории;
2. Обнаружение ситуации, требующей объезда;
3. Определение (нейросетью/агентом) параметров объезда;
4. Имитационное моделирование движения робота в точку объезда, моделирование движения подвижных препятствий;
5. Определение вознаграждения на этапе движения в точку объезда;
6. Имитационное моделирование возврата робота на траекторию движения, моделирование движения подвижных препятствий;
7. Определение вознаграждения на этапе возврата на траекторию движения к целевой точке;
8. Определение суммарного вознаграждения;

9. Запись полученного положительного опыта объезда препятствия в буфер данных для обучения (если объезд завершился без столкновений).

Пункты 3 – 8 могут повторяться многократно, до тех пор, пока не закончится резерв попыток поиска решения, либо не будет найдено удовлетворительное решение. Генерация различных ситуаций, с другим расположением препятствий и параметрами их движения выполняется многократно, до тех пор, пока размер буфера данных для обучения станет достаточным. После этого выполняется цикл обучения нейронной сети астор, для улучшения качества ее работы. Конкретизируем понятие внешней среды и параметров внешней среды, определяющих принятие решений нейронной сетью. Состояние внешней среды определим, как

$$S_t = [S_t^{obst} \cdot S_t^p \cdot S_t^{rob}] \quad (5)$$

где  $S_t^{obst}$  — набор данных о препятствиях ближней зоны робота, их движениях и движении самого робота в данный момент времени. Координаты указываются в системе координат робота, поскольку определяются имеющейся у него сенсорной системой;  $S_t^p = [x_{pj} \cdot y_{pj}]$  - состояние (положение) промежуточной точки, к которой движется робот;  $S_t^{rob} = [V_R \cdot \alpha_R]$  – состояние робота. Тогда

$$S_t^{obst} = [x_{oi} \cdot y_{oi} \cdot R_{oi} \cdot V_{oi} \cdot \alpha_{oi}] \quad (6)$$

где  $x_{pj}, y_{pj}$  – координаты промежуточной точки,  $V_R, \alpha_R$  – скорость и направление движения робота.  $x_{oi}, y_{oi}, R_{oi}$  – координаты препятствия и его размер,  $V_{oi}, \alpha_{oi}$  – скорость и направление движения препятствия. Такого описания достаточно, чтобы обученная НС могла принять решение в какую сторону, на какой скорости и за какое время робот должен переместиться для избежания столкновения. Если на этапе объезда и движения в промежуточную точку столкновения не произошло, то в алгоритме обучения сформируется поощрение, иначе начислены штрафные баллы. Особенностью реализованного в работе подхода является то, что нейросетевое решение формирует параметры движения робота в точку объезда с учетом параметров препятствий в ближней зоне робота, а также расположения траекторной точки. Функция вознаграждения определена следующим образом:

$$R = R_{dist} + R_v + R_c \quad (7)$$

где  $R$  – итоговое значение функции вознаграждения;  $R_{dist}$  – вознаграждение за очень близкое или очень далекое прохождение относительно препятствия при выполнении объезда;  $R_v$  – штраф за очень большое значение назначенной скорости, или за назначение очень малой скорости во время объезда;  $R_c$  – штраф за столкновение во время объезда препятствия. Дискретная и непрерывная формы функций вознаграждения представлены на рисунке 6.

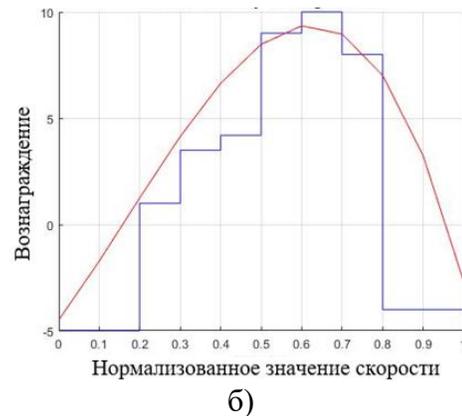
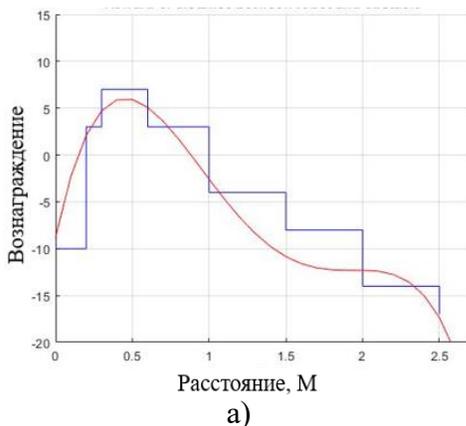


Рис. 6. Функция вознаграждения

а – за расстояние между роботом и препятствием во время его объезда б - за скорость объезда

Функция вознаграждения не может быть вычислена в тот же момент времени, когда НС предлагает решение и определяет параметры движения объезда. При «безопасном» достижении точки объезда может быть вычислена первая часть функции вознаграждения. При достижении траекторной точки, куда двигался робот, будет вычислена вторая часть функции вознаграждения. Вознаграждение за очень малое или очень большое расстояние между роботом и препятствием позволит в результате обучения достигать близкого к оптимальному решения даже в условиях подвижных препятствий.

Уравнение непрерывных аппроксимирующих функций вознаграждения:

$$R_v(V_r) = -48.6609V_r^3 + 24.7835V_r^2 + 25.7075V_r - 8.4890 \quad (8)$$

$$R_{dist} = -11.29 * dist^4 + 65.17 * dist^3 - 124.45 * dist^2 + 76.77 * dist - 8.78 \quad (9)$$

Где  $V_r$  – нормированная скорость робота, рекомендованная нейронной сетью,  $dist$  – расстояние между роботом и препятствием во время его объезда. Значимость каждого критерия для формирования поощрений в процессе обучения может уточняться на этапе обучения НС. При возникновении столкновений робота с препятствием в процессе объезда начисляется штраф. Функции вознаграждения определены на интервалах допустимых значений, и представлены в виде непрерывных функций.

Для обеспечения «свободы поиска наилучшего действия» в разрабатываемой НС введен стохастический элемент в политике Актора. Это позволяет «исследовать» различные варианты и находить наилучшие решения за счет разнообразия действий. В данном случае, энтропийная составляющая вознаграждения определяет возможность «случайного» отклонения в принимаемом «действии», что может привести к лучшему решению, чем ожидается на основании прошлого опыта. Практически эта случайная составляющая может выполнять свою функцию не в составе «функции вознаграждения» - поощряя нейросеть «исследовать новые варианты», а при формировании «параметров действий». То есть, решения о параметрах объезда - курс-скорость-длительность движения могут быть случайным образом изменены, и при получении «приемлемого результата» записаны в буфер опыта для обучения. Составляющая вознаграждения, зависящая от энтропии решений  $\alpha H(\pi(\cdot | s_t))$  пропорциональна сумме вероятностей значений, корректирующих параметры движения робота при объезде препятствия и время его движения в точку объезда.

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (10)$$

Таким образом, часть вознаграждения будет зависеть от вероятностей отклонения параметров объезда (энтропии решения) по сравнению с определенными в данной конкретной ситуации нейросетью.

**Структура и состав нейронной сети.** Примем, что максимальное количество препятствий, которые могут располагаться в ближней зоне МР не превышает 6. Для определения параметров объезда требуется информация об их расположении, размерах и параметрах движения. Также необходима информация о мобильном роботе и координаты очередной точки траектории, куда он движется. Таким образом, НС, реализующая функции актор, имеет 34 нейрона во входном слое. Скрытый слой содержит 15 нейронов. Количество нейронов выходного слоя – 3. На них формируются параметры движения робота в точку объезда, которые позволят объехать препятствие, с которым возможно столкновение. Этими параметрами являются - скорость движения робота  $V_r$ , направление его движения  $\alpha_R$  и время движения  $t_R$  до точки объезда. Данные для обучения выбираются из буфера, куда они помещались на этапах имитационного моделирования «поиска решений». Обучение выполняется циклически, по мере накопления в буфере данных их достаточного количества. Каждый цикл обучения приводит к изменению политики,

определяющей решения нейронной сети. Имитационное моделирование движений робота выполняется и с параметрами, рассчитанными нейронной сетью, и с параметрами, измененными с учетом энтропийной составляющей. Это улучшает работу алгоритмов обучения за счет увеличения свободы выбора при поиске решений нейронной сетью и нахождение наилучших параметров для объезда препятствия. В буфер обучения записываются данные, если для текущей ситуации внешней среды в рамках имитационного моделирования получено лучшее решение, определившее успешный объезд препятствия и возврат робота на запланированную траекторию.

Циклы имитационного моделирования и накопления данных для обучения повторяются многократно, до тех пор, пока не перестанут улучшаться показатели качества работы нейронной сети, а надежность объезда без столкновения не достигнет требуемого уровня. Особенностью предлагаемого метода планирования и управления движением робота в среде со статическими и динамическими препятствиями является использование прогнозной оценки вероятного столкновения и нейросетевого решения о параметрах движения МР для объезда препятствия и предотвращении столкновения. Обученная НС проверялась на тестовых наборах ситуаций, случайно выбранных из набора заготовленных вариантов расположения объектов. Проверка показала, что при вероятности столкновения, НС формировала адекватные параметры движения робота для объезда препятствия. Двигаясь с этими параметрами, МР перемещался в точку объезда, а затем в точку продолжения траектории без столкновений.

Результаты работ сформулированы следующим образом. В известных решениях, обеспечивающих объезд препятствий стохастичность их параметров, обусловленная измерительной подсистемой, не учитывается. При обнаружении возможного столкновения, полномасштабный поиск новой траектории движения к целевой точке требует значительных вычислительных и временных ресурсов, может быть, не обеспечен необходимой информацией о препятствиях во всей рабочей зоне и далеко не всегда является целесообразным. Предпочтительным является поиск вариантов объезда препятствия с возвратом к ранее запланированной траектории движения к целевой точке. Поиск путей движения робота при объезде препятствия должен учитывать прогноз, на основе имеющейся в данный момент информации о возможном расположении статических или динамических препятствий. Информация, необходимая для принятия нейронной сетью решения о параметрах движения для объезда препятствия может быть получена информационно-сенсорной системой робота. В предложенном методе планирования и управления движением робота при объезде препятствий учитывается вариантность расположения препятствий и случайный характер движения динамических препятствий. Принимаемые нейронной сетью решения эффективны для любых допустимых взаиморасположении препятствий и размещения целевой точки и обеспечивают безопасное перемещение МР в точку объезда и возврат на траекторию.

К результатам, полученным в данной главе, относятся:

- метод прогнозирования и принятия решений об объезде препятствий при траекторном движении робота в среде с препятствиями при стохастичности параметров их движения;
- методика создания нейронной сети планирования движений МР для объезда препятствий, реализующая обучение с подкреплением при использовании энтропийной составляющей для поиска наилучших решений;
- метод определения параметров движения робота для выполнения объезда препятствия на основе вероятностной оценки столкновения на интервале прогнозирования и нейросетевом определении параметров движения МР;
- нейронная сеть, реализующая обучение с подкреплением, предназначенная для определения параметров движения мобильного робота для выполнения объезда препятствий, с учетом стохастичности параметров их движения;

Сущность метода обеспечения безопасного движения робота по запланированной траектории составляет необходимая последовательность действий и принятия решений:

- определение сенсорной системой робота текущего расположения препятствий в ближней зоне робота и параметров их движения;
- прогнозирование изменения ситуации в ближней зоне на заданном интервале времени с учетом стохастичности параметров препятствий;
- определение вероятности возможного столкновения;
- нейросетевое принятие решений о параметрах движения робота (поведении робота) для выполнения объезда;
- управления движением робота к точке объезда (реализуется системой управления робота)
- возвращение робота на траекторию движения к целевой точке (реализуется системой управления робота)

**В четвертой главе** выполнена разработка необходимых математических моделей и имитационное моделирование процессов планирования и управления траекторным движением МР при наличии статических и динамических препятствий. Определены требования к моделям, которые обеспечат оценку различных методов планирования и управления движением МР. В качестве вычислительной среды использованы пакеты Matlab и CoppeliaSim. Для оценки эффективности разработанных решений в качестве альтернативных выбраны метод потенциальных полей, имеющий широкое практическое применение и метод, обеспечивающий движение робота к целевой точке на основе алгоритма  $A^*$ . Целью сравнительного моделирования является проверка эффективности указанных методов по обеспечению движения МР к целевой точке без столкновений. Требования к функционалу и возможностям программ моделирования сформулированы следующим образом:

1. моделировать движение МР в целевую точку на основе метода потенциальных функций, или на основе  $A^*$  или на основе предлагаемого метода;
2. моделировать неподвижные и подвижные препятствия в рабочей зоне робота;
3. моделировать изменение векторов скоростей подвижных препятствий, считая закон распределения параметров движения нормальным, а параметры распределений известными;
4. Для анализа, сравнения и апробации алгоритмов управления, модель должна обеспечивать многократное «повторение некоторых случайных траекторий движения препятствий» при движении робота на базе тестируемых методов;
5. Моделировать прогнозную оценку столкновений, нейросетевое планирование параметров движения при объезде и объезд препятствий (для модели на основе разработанного метода);

Для проверки корректности модели движения МР на основе метода потенциальных функций, был выполнен ряд экспериментов и сделаны следующие выводы.

1. Качество/эффективность управления движением МР на основе потенциальных функций существенно зависят от выбора параметров в уравнениях, определяющих силы притяжения и отталкивания.
2. В экспериментах определена специфичность применения метода на основе потенциальных функций при наличии подвижных препятствий, возможность попадания робота в «потенциальную яму».

При разработке математической модели, реализующей метод управления движением робота на основе  $A^*$ , был использован алгоритм, основанный на клеточном разбиении рабочего пространства.

В основе модели движения робота с учетом стохастичности параметров движения препятствий положен разработанный метод прогнозирования и нейросетевого планирования параметров объезда. В модели реализованы возможности:

- параметры закона распределения случайных величин направления движения препятствий определены и описаны математическими ожиданиями, среднеквадратическими отклонениями и дисперсиями направлений движения;

- координаты и вектор скорости каждого препятствия в ближней зоне робота доступны для измерения через некоторый интервал времени  $t_{изм}$ .
- ошибки измерения положения и параметров движения препятствия не изменяют закона распределения случайных величин, который остается нормальным.

Указанное справедливо в предположении, что системой управления робота осуществляется мониторинг области, где происходит движение робота. Следует отметить, что для имитированной системы управления робота информация о препятствиях обновлялась через интервал времени  $t_{изм}$ , который превышает интервал времени принятия решений о параметрах движения робота. Под интервалом прогнозирования принят некоторый интервал времени  $t_0$  для которого выполняется прогноз движения препятствия и оценивается вероятность столкновения с ними МР. Чем больше будет величина  $t_0$ , тем меньше надежность прогноза. Однако, уменьшение прогнозируемого интервала значительно меньше величины  $t_{изм}$  из-за возрастания вычислительных издержек системы управления без адекватного (соответствующего) роста качества планирования траектории движения робота. В общем случае выбор значения  $t_0$  зависит от скоростных и динамических характеристик робота и значения  $t_{изм}$  информационно-измерительной подсистемы. Реализованный в работе метод планирования и управления движениями МР при объезде препятствия, базируется на прогнозной вероятностной оценке столкновения и нейросетевого решения параметров движения объезда в среде с динамическими и статическими препятствиями.

Для сравнения различных методов были проведены численные эксперименты. Моделирование выполнялось для различного количества препятствий в зоне робота, а также при различных диапазонах возможных скоростей динамических препятствий. С использованием каждой из разработанных моделей имитировалось движение МР к целевой точке. Модель на основе потенциальных функций в глобальной траектории движения не нуждалась. Для двух других моделей выполнялось планирование глобальной траектории с использованием алгоритма  $A^*$ . Модель, осуществляющая управление движением робота только на основе найденной траектории не имела возможностей изменять параметры своего движения. Модель, где управление реализовано на базе разработанного метода, осуществляла прогнозирование и нейросетевое планирование объезда. После объезда робот возвращался на заданную траекторию.

Наблюдаемыми результатами имитационного моделирования являлись события столкновений робота с препятствиями или достижения целевой точки, а также общее время, затраченное на достижение целевой точки. Условия моделирования предполагали случайное расположение и параметры препятствий. Для всех тестируемых моделей «наборы ситуаций» с положением целевой точки, начальным положением и параметрами робота, «поведением» и параметрами препятствий были одинаковыми. Результаты этой серии экспериментов показали, что на большом пути к целевой точке (рабочая зона 30x30 метров):

- движение по наилучшей траектории, спроектированной до начала движения на основе данных о препятствиях ( $A^*$ ), может завершиться столкновением с вероятностью до 80% при большом количестве препятствий и их скоростях;
- движение под управлением метода потенциальных полей в большей части случаев завершается в целевой точке, однако, иногда (вероятность до 10%) может завершиться столкновением или попаданием в «потенциальную яму». Может иметь место выбор не наилучших траекторий, что увеличивает длину пути и время перемещения;
- траекторные движения с использованием разработанного метода обеспечили движения без столкновений за счет их прогноза и нейросетевого планирования объезда препятствия с учетом текущего расположения и параметров препятствия в ближней зоне робота. Это обеспечивало выполнение объезда и возврат на прерванную траекторию;

- сравнительные испытания показали, что в среднем время достижения целевой точки с учетом объезда для разработанного метода до 20% лучше (по критерию время перемещения) показателей для других методов планирования движений при возможности столкновения.

Чтобы минимизировать влияние длины пути на такой показатель качества как время, затраченное на предотвращение столкновения (объезд), были сформулированы условия проведения другой серии испытаний следующим образом. Размер рабочей зоны ограничен зоной  $\pm 3$  метра от робота, количество препятствий в этой зоне не более 6 из них часть – неподвижных, а часть подвижных. Как и ранее, параметры препятствий генерировались случайным образом. Для каждой сцены, на интервале времени моделировался реализовался «случайный» характер движения препятствий. Каждая имитационная модель (использующая  $A^*$ , метод потенциальных полей или разработанный метод) реализовывала движение робота на конкретной сцене в заданную траекторную точку. На основе большого количества сгенерированных сцен выполнено имитационное моделирование. Регистрировались случаи столкновения, успешного объезда препятствий, время, затраченное на выполнение всех перемещений и достижения заданной траекторной точки. Результаты этих серий экспериментов показали, что:

- движение по траектории, определяемой алгоритмом  $A^*$  завершалось столкновением с вероятностью до 40%;
- движение под управлением метода потенциальных полей в большей части случаев завершается в целевой точке, однако, с вероятностью 25 – 30% может произойти столкновение или попадание в «потенциальную яму»;
- траекторные движения с использованием разработанного метода позволяют избегать столкновений за счет их прогноза и нейросетевого планирования объезда препятствий с учетом расположения и параметров препятствий в ближней зоне робота;
- разработанные в диссертационном исследовании методы предотвращения столкновений и управления движениями МР в среде с препятствиями работоспособны, и имеют эффективность выше методов, с которыми выполнялось сравнение. Коэффициент сравнения по критерию время выполнения перемещений в заданную точку с результатами на основе алгоритма  $A^*$  составил 0.8, коэффициент сравнения с результатами на основе потенциальных полей составил 0.89.

При разработке моделей были учтены условия, в которых реально осуществляется функционирование роботов. Также были учтены реальные возможности систем управления автономных роботов по получению информации о внешнем мире. В экспериментах были обеспечены единые условия «случайного движения динамических препятствий», что позволило соотносить результаты и делать заключения об эффективности методов. Таким образом разработанный в диссертационном исследовании метод планирования и управления движениями МР в среде с препятствиями работоспособен, и обладает эффективностью.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

В работе, в соответствии с целью диссертационного исследования, решены поставленные задачи и получены следующие результаты:

- оценены возможности сенсорных систем мобильных роботов по обеспечению информацией о расположении и параметрах препятствий в ближней зоне робота, выполнена оценка погрешностей вычисления координат и параметров движения препятствий;
- разработан метод управления движениями робота при объезде препятствий, предотвращающий его столкновения в среде с препятствиями, основанный на оценке вероятности столкновения на интервале прогнозирования с учетом стохастичности параметров движения препятствий и определения с помощью нейронной сети параметров движения робота для объезда препятствия;

- разработан нейросетевой планировщик, определяющий параметры движения робота для объезда препятствий, структура которого и алгоритмы обучения с подкреплением позволяют учитывать параметры препятствий в ближней зоне робота;
- предложен метод энтропийной регуляризации решений нейросетевого планировщика движений робота для объезда препятствия, основанный на коррекции выходных значений нейронной сети, а не на изменении функций вознаграждения, что обеспечивает поиск наилучших решений для объезда препятствий;
- разработаны алгоритмы принятия решений об объезде препятствий и определения параметров движения робота для объезда, позволяющие роботу избежать столкновения и продолжить движение по траектории;
- разработана имитационная модель движения МР и препятствий, учитывающая стохастичность параметров движения препятствий и обеспечивающая вероятностную оценку возможных столкновений на заданном интервале времени;
- выполнено сравнительное тестирование различных методов управления мобильным роботом в среде со статическими и динамическими препятствиями, показавшее работоспособность и эффективность применения разработанного метода управления движениями робота при объезде препятствий, что обеспечивает предотвращение столкновений при движении робота к целевой точке.

Таким образом, задачи, поставленные в диссертационной работе, решены, полученные результаты обладают научной новизной и практической значимостью для таких областей как проектирование систем навигации и управления мобильных роботов, работающих в недетерминированных условиях, разработки алгоритмов управления мобильными роботами, создания систем управления роботом, обеспечивающих их движение без столкновений с препятствиями за счет прогнозной оценки и планирования движений объезда с использованием разработанного в диссертации метода.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В научных журналах, рекомендованных ВАК:**

1. Алхалили, А. С. Управление движением колесного мобильного робота на основе имитационного моделирования / А. С. Алхалили, Е. А. Лукьянов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 8. – С. 112-121. – DOI 10.34031/2071-7318-2022-7-8-112-121. – EDN XJSZPY. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49315754>
2. Алхалили А. С. Б. Стохастическое оценивание при планировании траектории движения в среде с подвижными препятствиями / А. С. Б. Алхалили, Е. А. Лукьянов // Наука и бизнес: пути развития. – 2023. – № 3(141). – С. 64-70. – EDN EZQFDC. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53810804>
3. Алхалили А. С. Б. Имитационная модель траекторного движения мобильного робота / А. С. Б. Алхалили, Е. А. Лукьянов // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 5(131). – С. 217-224. – EDN CFVLCO <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49185825>
4. Алхалили А. С. Б. Создание виртуального датчика для моделирования систем инерциальной навигации / Алхалили А.С.Б., Лукьянов Е.А., Мпенгеле Э.Б. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2025. – № 3. – С. 125–135. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-125-135.

### **В изданиях, включенных в международную базу данных Scopus:**

1. Alkhaleeli A.S.B. Movement strategies selection of a mobile robot to avoid obstacles/ A.S.B. Alkhaleeli, E.A. Lukyanov // E3S Web of Conferences. –2023. Doi: 389. 10.1051/e3sconf/202338907003. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61795378;> [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/26/e3sconf\\_uesf2023\\_07003/e3sconf\\_uesf2023\\_07003.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/26/e3sconf_uesf2023_07003/e3sconf_uesf2023_07003.html)

### **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:**

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2023614532 Российская Федерация. Планирование и управление движением мобильного робота при наличии подвижных и

неподвижных препятствий. /авторы, заявители и правообладатели Лукьянов Е. А., Алхалили А. С. Б. – №2023612590; заявл. 08.02.2023; опубл 02.03.2023. – 1с. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50426933>

#### Публикации в материалах научных конференций:

1. Динамика технических систем "ДТС-2021": Материалы XVII международной научно-технической конференции, Ростов-на-Дону, 09–11 сентября 2021 года. – Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью "ДГТУ-ПРИНТ", 2021. – 61 с. – ISBN 978-5-6047596-1-5. – EDN XEESCJA. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47936386>
2. Алхалили, А. С. Планирование траектории движения мобильного робота на основе вероятностных оценок / А. С. Алхалили, Е. А. Лукьянов // Исследование и проектирование интеллектуальных систем в автомобилестроении, авиастроении и машиностроении: VII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, Таганрог, 07 апреля 2023 года. – Таганрог: Общество с ограниченной ответственностью «ЭльДирект», 2023. – С. 6-11. – EDN KQKMVS. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54274215>, <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54274193>
3. Алхалили, А. С. В. Справочное исследование методов управления мобильного робота / А. С. В. Алхалили, Е. А. Лукьянов // Проблемы повышения эффективности научной работы в оборонно-промышленном комплексе России: Материалы V Всероссийской научно-практической конференции, Знаменск, 24–25 марта 2022 года / Сост.: С.Н. Бориско. – Астрахань: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный университет», 2022. – С. 164-169. – DOI 10.54398/9785992613728\_164. – EDN AOYBLG. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48664825>
4. Алхалили, А. С. Формирование стратегий объезда препятствий при движении робота в неопределенной среде / А. С. Алхалили, Е. А. Лукьянов // Актуальные проблемы науки и техники. 2023: Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 15–17 марта 2023 года / Ответственный редактор Н.А. Шевченко. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2023. – С. 818-819. – EDN RBRUJU. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54103422>
5. Алхалили, А. С. В. Имитационное моделирование траекторного движения мобильного робота / А. С. В. Алхалили, Е. А. Лукьянов // Актуальные проблемы науки и техники. 2021: Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 17–19 марта 2021 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2021. – 1163 с. – ISBN 978-5-7890-1918-4. – EDN EOACBX. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46286068>
6. Алхалили, А. С. В. Виртуальное моделирование движения мобильной робототехнической группы при стохастичности параметров их движения / А. С. В. Алхалили, Е. А. Лукьянов // Актуальные проблемы науки и техники – 2022: Материалы XV Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, Уфа, 28 марта – 01 2022 года. Том 2. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2022. – 274 с. – ISBN 978-5-7831-2212-5. – EDN AIAOLJ. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48604618>
7. Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки и техники. 2024», 19–21 марта 2024 года, Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет.

---

В печать \_\_\_\_\_.2025. Формат 60x84/16.  
Объем 1,3 усл. п. л. Тираж 120 экз. Заказ № \_\_\_\_\_

---

Отпечатано в типографии издательского центра ДГТУ  
Адрес университета и полиграфического предприятия:  
344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1