

На правах рукописи

Яковлев Дмитрий Сергеевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ АВТОНОМНОМ
УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ НАЗЕМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ**

Специальность 2.5.4
Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Тачков Александр Анатольевич**,
кандидат технических наук, директор
инжинирингового центра «Автоматика и
робототехника», доцент кафедры теории машин и
механизмов МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты: **Абросимов Вячеслав Константинович**
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, ведущий научный сотрудник Главного
научно-исследовательского испытательного
межвидового центра перспективного вооружения
(ГНИИМЦ ПВ) Министерства обороны РФ.

Прокопьев Игорь Витальевич
доктор технических наук, ведущий научный
сотрудник Федерального исследовательского
центра «Информатика и управление» Российской
академии наук (ФИЦ ИУ РАН)

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное
научное учреждение «Центральный научно-
исследовательский и опытно-конструкторский
институт робототехники и технической
кибернетики» (ЦНИИ РТК)**

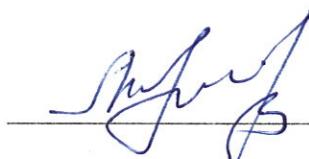
Защита состоится «14» мая 2024 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.331.14 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный переулок, д. 10, ауд. 613м

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направить по адресу: 105005 г. Москва, 2-я Бауманская, д.5, стр.1, МГТУ им. Н.Э. Баумана на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Муратов И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время наблюдается стремительное расширение области применения беспилотных транспортных средств или, так называемых, наземных мобильных роботов (далее МР). Несмотря на то, что внедрение МР в повседневную жизнь находится пока еще на начальной стадии, уже имеется информация о произошедших по вине систем автономного управления движением (САУД) нескольких серьезных авариях МР фирм Uber, Tesla. Одна авария со смертельным исходом произошла в 2016 году с беспилотным автомобилем компании Tesla и одна в 2018 году при тестировании беспилотного автомобиля компании Uber. В первом случае автомобиль протаранил прицеп грузовика в результате некорректной идентификации последнего информационно-измерительной системой беспилотного автомобиля. Во втором случае авария произошла также по причине ошибочной идентификации человека с велосипедом как пешехода. Комиссия, ведущая расследование аварии с участием беспилотного автомобиля Uber, в качестве сопутствующих причин столкновения указала "неадекватные процедуры оценки рисков безопасности", а также отсутствие официального плана обеспечения безопасности. По результатам эксплуатации беспилотных автомобилей, компаний Waymo и Cruise в 2021 году в Сан-Франциско произошло 53 столкновения. В ноябре 2022 года автомобиль Tesla, находясь в режиме беспилотного управления движением, устроил массовую аварию в тоннеле. Причиной аварии послужила необоснованная остановка автомобиля Tesla в потоке других машин. Также известны случаи аварий МР при решении специальных задач в автономном (беспилотном) режиме. Анализ таких аварий показывает, что задача обеспечения безопасного (безаварийного) автономного движения МР является актуальной.

Степень разработанности проблемы. Под термином «безопасность» при автономном управлении движением МР понимается такое состояние МР, при котором не возникает препятствующих выполнению движения по опорному маршруту (целевой задачи) внешних воздействий или эти воздействия не приводят к аварии. В качестве внешнего воздействия рассматривается столкновение МР с объектом внешней среды (препятствием). Под аварией понимается такое столкновение, в результате которого МР теряет возможность дальнейшего движения. Имеющийся научный задел в области обеспечения безопасности при автономном управлении движением носит достаточно фрагментарный характер. В работах С.Л. Зенкевича, Б.Б. Михайлова, В.П. Носкова, S. Thrun, W. Burgard, C. Stachniss, D. Fox представлены подходы к выбору оптимальной траектории движения МР с учетом возникающих препятствий на пути его следования. Частные задачи вероятностного анализа аварийных ситуаций рассмотрены в работах В.Н. Герасимова, Д. Е. Моторина, Н. С. Шипилько, J. Rios-Martinez, A. Spalanzani, C. Laugier, M. S. Gandhi, B. Vlahov, J. Gibson, G. Williams, X. He, Y. Liu, C. Lv, X. Ji, T. Gindele, S. Brechtel, R. A. Dillmann, H. Xuemin, C. Long, T. Bo, C. Dongpu, H. Haibo. Результаты исследований в области безопасности сложных технических систем представлены в работах Н.А. Северцева, В.К. Дедкова, А.В. Бецкова, Е.А. Воронина, И.В. Прокопьева. В том числе, ими разработана концепция

количественной оценки уровня безопасности и представлены научно обоснованные методы обеспечения необходимого уровня безопасности сложных технических систем. Мобильный робот, осуществляющий движение в автономном режиме, так же является сложной технической системой, и может перемещаться как в условиях индустриально-городской среды, так и пересеченной местности.

Из результатов анализа существующих решений по обеспечению безаварийного движения МР можно сделать вывод, что имеющиеся методы не учитывают требования к качеству выполнения целевой задачи, поэтому необходима разработка метода, предотвращающего аварию при движении МР для указанных выше условий с учетом этих требований.

Целью диссертационного исследования является обеспечение безопасности при автономном управлении движением мобильного робота с учетом предъявляемых требований к качеству выполнения целевой задачи: допустимой величины круговой ошибки попадания МР в последнюю точку опорного маршрута и времени его прохождения.

Задачи исследования:

1. Формализовать задачу обеспечения безопасности при автономном управлении движением МР.
2. Разработать метод обеспечения безопасности при автономном управлении движением МР, с учетом предъявляемых требований к качеству выполнения целевой задачи.
3. Разработать методику адаптации метода в зависимости от условий функционирования МР и предъявляемых требований к качеству выполнения целевой задачи.
4. Провести сравнительный анализ разработанного метода обеспечения безопасности при автономном управлении движением МР с известными методами.
5. Осуществить программную реализацию разработанного метода и провести натурный эксперимент на макете МР по обеспечению безопасности при автономном управлении движением.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Предложена постановка задачи обеспечения безопасности при автономном управлении движением МР, отличающаяся от известных постановок учетом требований к качеству выполнения целевой задачи.
2. Предложен новый алгоритм оценки вероятности столкновения МР с препятствием, отличающийся от известных учетом экспериментально полученных законов распределения величин бокового и углового отклонений МР от траектории движения.
3. Разработан метод формирования и выбора стратегии для обеспечения безопасного движения МР при автономном управлении, отличающийся от известных выполнением анализа значений рисков возникновения ошибок первого и второго рода при идентификации потенциальной аварии.
4. Предложен новый алгоритм оценки потенциальных ущербов, полученных в результате движения МР в соответствии с выбранной стратегией, отличающийся от известных применением эвристических функций,

учитывающих как последствия потенциальной аварии, так и предполагаемое влияние на качество выполнения целевой задачи.

5. Получено решение задачи оптимизации значений весовых коэффициентов эвристических функций с использованием статистического имитационного моделирования, отличающееся от известных учетом условий функционирования МР и предъявляемых требований к качеству выполнения целевой задачи.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов обеспечения системной безопасности при автономном управлении движением, основанных на анализе вероятности столкновения МР с препятствиями, как количественного показателя потенциальной аварии с учетом требований к результату движения МР по опорному маршруту.

Практическая значимость.

1. Разработана методика учета динамических характеристик замкнутого контура управления САУД МР при оценке вероятности столкновения с препятствием.

2. Разработаны алгоритмы выбора траектории и изменения скорости в процессе движения МР, которые позволили повысить оценочное значение вероятности успешного выполнения МР целевой задачи с 0,28 до 0,71 при одновременном снижении оценочного значения вероятности аварии с 0,72 до 0,29 по сравнению с известными методами.

3. Разработана методика учета требований к качеству выполнения целевой задачи при принятии САУД решений для предотвращения возможных столкновений в процессе движения МР.

4. Разработан встраиваемый в САУД МР программный модуль обеспечения безопасности при автономном управлении движением.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе для решения поставленных задач были использованы методы теории автоматического управления, теории вероятностей и математической статистики, теории принятия решений, теории математического моделирования, имитационного моделирования. Математическое и имитационное моделирование проводилось в пакетах Matlab и Matlab Simulink. Разработка программного обеспечения выполнялась на языке программирования C++ с помощью связующего программного обеспечения (ПО) Robot Operating System (ROS) в среде Qt.

Положения, выносимые на защиту.

1. Методика учета динамических характеристик замкнутого контура управления САУД МР, полученных с помощью статистического анализа возможных отклонений МР от траектории движения, при выполнении оценки вероятности его столкновения с препятствием.

2. Метод обеспечения безопасности движения МР за счет выбора траектории и оценки допустимого значения скорости движения, позволяющих выполнить МР целевую задачу с минимальным риском столкновения при заданных требованиях к качеству её выполнения.

3. Статистическая имитационная модель движения МР по опорному маршруту, позволяющая оптимизировать значения весовых коэффициентов

эвристических функций с учетом требований к качеству выполнения целевой задачи.

4. Методика определения весовых коэффициентов эвристических функций для адаптации функционирования разработанного метода под предъявляемые требования к целевой задаче и условиям применения МР.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается обоснованностью использования теоретических положений и методов, корректностью постановки и решения задач исследования, согласованностью теоретических выводов с данными вычислительных и натурных экспериментов.

Внедрение результатов. Материалы диссертационной работы были использованы в составной части научно-исследовательской работы, выполненной МГТУ им. Н.Э. Баумана по заказу ФГУП «ВНИИА» (ГК «Росатом») по договору от 01 марта 2019 г. № 03.04.04-18/03/2019, и макете комплекса аппаратно-программных модулей для обеспечения режима автономного управления движением наземных робототехнических комплексов, что подтверждается соответствующим актом внедрения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались на III международной научно-практической конференции «Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надёжности, устойчивости и эффективности систем» (Елец, 2019 г.), XXXI, XXXII, XXXIII международных научно-практических конференциях «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2020 г.; Санкт-Петербург, 2021 г. Санкт-Петербург, 2022 г.), Саммите молодых ученых и инженеров «Большие вызовы для общества, государства и науки» (Сочи, 2021 г.), международной научно-технической конференции «Автоматизация» (RusAutoCon-2021) (Сочи, 2021 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 8 научных трудах, среди которых 1 публикация в издании, индексируемом в Scopus, 4 публикации в изданиях из перечня ВАК РФ.

Личный вклад автора. Исследования, результаты которых отражены в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Соискателем лично изложены теоретические положения методов и алгоритмов в области обеспечения безопасности при автономном управлении движением МР, проведены статистическое имитационное моделирование и натурные эксперименты с описанием их результатов, а также разработан программно-алгоритмический модуль. В научных работах, выполненных в соавторстве, личный вклад соискателя состоит в следующем: [1] – разработка методики адаптации САУД под различные условия применения МР с помощью автоматической параметрической настройки алгоритма планирования траектории; [4,7] – теоретическое обоснование подхода к оценке вероятности столкновения МР с препятствием, разработка структуры САУД МР и алгоритма предотвращения ожидаемого столкновения; проведение натурного эксперимента, анализ его результатов и формулировка выводов; [6] – теоретическое обоснование метода обеспечения безопасности при автономном управлении движением МР; разработка статистической имитационной модели

движения МР по опорному маршруту, проведение моделирования, анализ результатов и формулировка выводов; [2] – описание принципов использования дискретно-событийной модели для логической синхронизации работы программных модулей САУД МР и обеспечения его безопасности при автономном управлении движении; [3] – проведение натурных испытаний и исследование динамических характеристик МР; [8] – поиск и анализ существующих подходов к обеспечению безопасности при автономном управлении движением МР.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложения. Работа изложена на 191 машинописной странице, содержит 47 рисунков и 16 таблиц. Список литературы включает в себя 107 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель, задачи исследования, научная новизна и практическая ценность диссертационной работы, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** выполнен аналитический обзор подходов к обеспечению безаварийного движения МР. По результатам анализа существующих подходов составлены классификации причин возникновения аварийных ситуаций и решаемых задач по их предотвращению. С помощью составленных классификаций определено место задачи обеспечения безопасности движения в процессе проектирования САУД МР (Рис. 1).

Задача автономного управления движением МР рассматривается в следующей постановке. Движение МР со скоростью $\mathbf{v}^{(r)}(t)$ осуществляется по заданному в виде последовательности из m точек опорному маршруту $TR = \left(\mathbf{tr}_j \right)_{j=1}^m$, в среде с препятствиями $OB_i = \left\{ \mathbf{ob}^{(k)} \mid k = \overline{0, K} \right\}$, часть из которых статические $\left\| \mathbf{v}_{ob}^{(k)} \right\| = 0$, часть – динамические $\left\| \mathbf{v}_{ob}^{(k)} \right\| > 0$, где $\mathbf{ob}^{(k)} = \left(\mathbf{\omega}^{(k)}, \varphi^{(k)}, \mathbf{v}_{ob}^{(k)}, \mathbf{\Lambda}^{(k)} \right)^T$, $\mathbf{\omega}^{(k)}$ – пространственные координаты, $\varphi^{(k)}$ – тип (класс), вектор скорости движения $\mathbf{v}_{ob}^{(k)}$ и габариты k -го препятствия $\mathbf{\Lambda}^{(k)} \in \mathbb{R}^3$.

Движение от точки \mathbf{tr}_j к точке \mathbf{tr}_{j+1} происходит с учетом препятствий OB_i по одной из траекторий множества $\left\{ \mathbf{r}_i \mid i = \overline{1, n} \right\}$. Построение каждой траектории из множества $\left\{ \mathbf{r}_i \mid i = \overline{1, n} \right\}$ осуществляется программно-алгоритмическим модулем (ПАМ) планирования траектории. Безопасность движения МР обеспечивается выбором траектории и регулированием скорости, образующих стратегию движения МР. Задача обеспечения безопасности решается одним из алгоритмов САУД МР на основе анализа карты внешней среды. Такой алгоритм должен учитывать вероятность возникновения ошибок в классификации внешней среды, возможность генерации небезопасных траекторий и отклонения МР от спланированной траектории. Полноценный анализ таких данных

возможен в случае независимого функционирования алгоритма обеспечения безопасности при автономном управлении движением от других алгоритмов САУД МР.

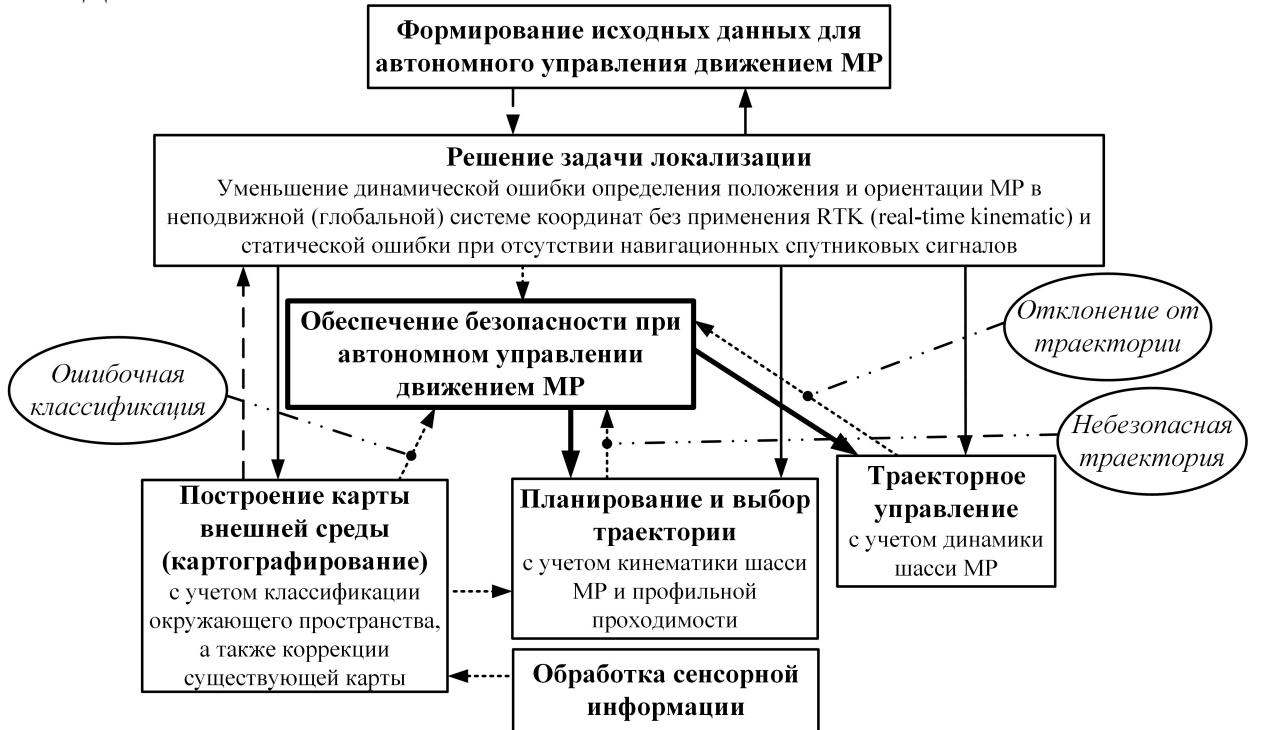


Рис. 1. Схема взаимодействия алгоритмов в САУД МР

Научная задача исследования сформулирована автором следующим образом. Необходимо определить значения компонентов вектора параметров **Param**, которые для каждого $t \in [0, T]$ определяют оптимальную по статистическому критерию (Байеса, минимаксный, Неймана-Пирсона и др.) стратегию движения МР $\mathbf{st}^*(t) = (\mathbf{r}^*(t), V^*(t))^T \in ST$ из множества доступных стратегий ST ($\mathbf{r}^*(t) \in \{\mathbf{r}_i \mid i = \overline{1, n}\}$ – оптимальная траектория, $V^*(t)$ – безопасная скорость, T – время движения по опорному маршруту), последовательность которых на интервале времени T минимизирует функционал:

$$J(ST^*) = \min_{\text{Param} \in \{\text{Param}\}^o} M \left[g_{dist}(T) + g_{dam}(T) + \int_0^T c_t(t) dt \right], \quad (1)$$

где $J(ST^*)$ – потери, связанные с движением МР в соответствии с последовательностью оптимальных стратегий $ST^* = \mathbf{st}_1^*, \mathbf{st}_2^*, \dots$ при выполнении задачи $\text{Task} = (TR, V_{\max}, \bar{V})^T$, V_{\max} – максимальная скорость движения МР по опорному маршруту, \bar{V} – желаемое значение средней скорости движения МР по опорному маршруту, $\bar{c}_t(T) = \int_0^T c_t(t) dt$ – функция траекторных потерь (функция потерь в зависимости от времени прохождения опорного маршрута), $g_{dist}(T)$, $g_{dam}(T)$ – функции терминальных потерь (функция потерь в зависимости от значения круговой ошибки попадания МР в последнюю точку опорного

маршрута и функция физических потерь соответственно), $\{\mathbf{Param}\}^\delta$ – множество допустимых значений компонентов вектора параметров.

Вторая глава посвящена разработке метода обеспечения безопасности при автономном управлении движением МР (Рис. 2). В результате анализа различных факторов аварийных ситуаций был сделан вывод, что большинство из них имеют стохастическую природу. Поэтому за показатель аварийной ситуации была принята вероятность столкновения МР с препятствиями. Элементы (элементарные участки) внешней среды предлагается разделить на конечное множество классов объектов $CL = CL_{coll} \cup CL_s$, столкновение МР с которыми может приводить (CL_{coll}) или не приводить (CL_s) к аварии, а информацию о них хранить с помощью многослойной клеточной карты $\mathcal{M}(\Omega_h, lr, cl) = \{(c_{ij}, s) \mid c_{ij} = c(t, \omega_{ij}, s), \omega_{ij} \in \Omega_h, s = \overline{0, lr}, lr \in \mathbb{N}\}$, состоящей из lr слоев (клеточных плоскостей) и результирующего слоя $\mathcal{L}_0(\Omega_h, cl)$, где $\Omega_h = \bigcup_{(i,j) \in I_h} \omega_{ij}, I_h \subset \mathbb{Z}^2$ – дискретное представление (замощение) в виде множества клеток ω_{ij} некоторой области окружающего пространства Ω_h . Значение c_{ij} в клетке $(i, j) \in \Omega_h$ результирующего слоя $\mathcal{L}_0(\Omega_h, cl)$ рассчитывается по данным клеток (i, j) слоев $\{\mathcal{L}_s(\Omega_h, cl) \mid s = \overline{0, lr}\}$ в соответствии с формулой Байеса, что позволяет учесть разнородную информацию от информационных средств:

$$c_{ij} = \arg \max_{q=1,2,\dots,cl} \left(\frac{P(c_{ij}^{(q)}) P(D \mid c_{ij}^{(q)})}{\sum_{kc=1}^{cl} P(c_{ij}^{(kc)}) P(D \mid c_{ij}^{(kc)})} \right),$$

где верхний индекс в записи $c_{ij}^{(q)}$ обозначает, что c_{ij} соответствует классу $q \in CL$, $D = \{(c_{ij}, s) = \mathcal{M}(\Omega_h, lr, cl; i, j) \mid s = \overline{1, lr}\}$, $P(c_{ij}^{(q)})$ – априорная вероятность появления класса q в клетке (i, j) , $P(D \mid c_{ij}^{(q)})$ – условная вероятность появления совокупности значений D в слоях $s = \overline{1, lr}$, если в действительности в клетку (i, j) попадает объект класса q . Обновление результирующего слоя карты выполняется с периодом Δt на интервале времени выполнения целевой задачи $[0, T]$.

Разработанный автором метод обеспечения безопасности при автономном управлении движением МР базируется на использовании результирующего слоя карты внешней среды и состоит из трех этапов (Рис. 2).

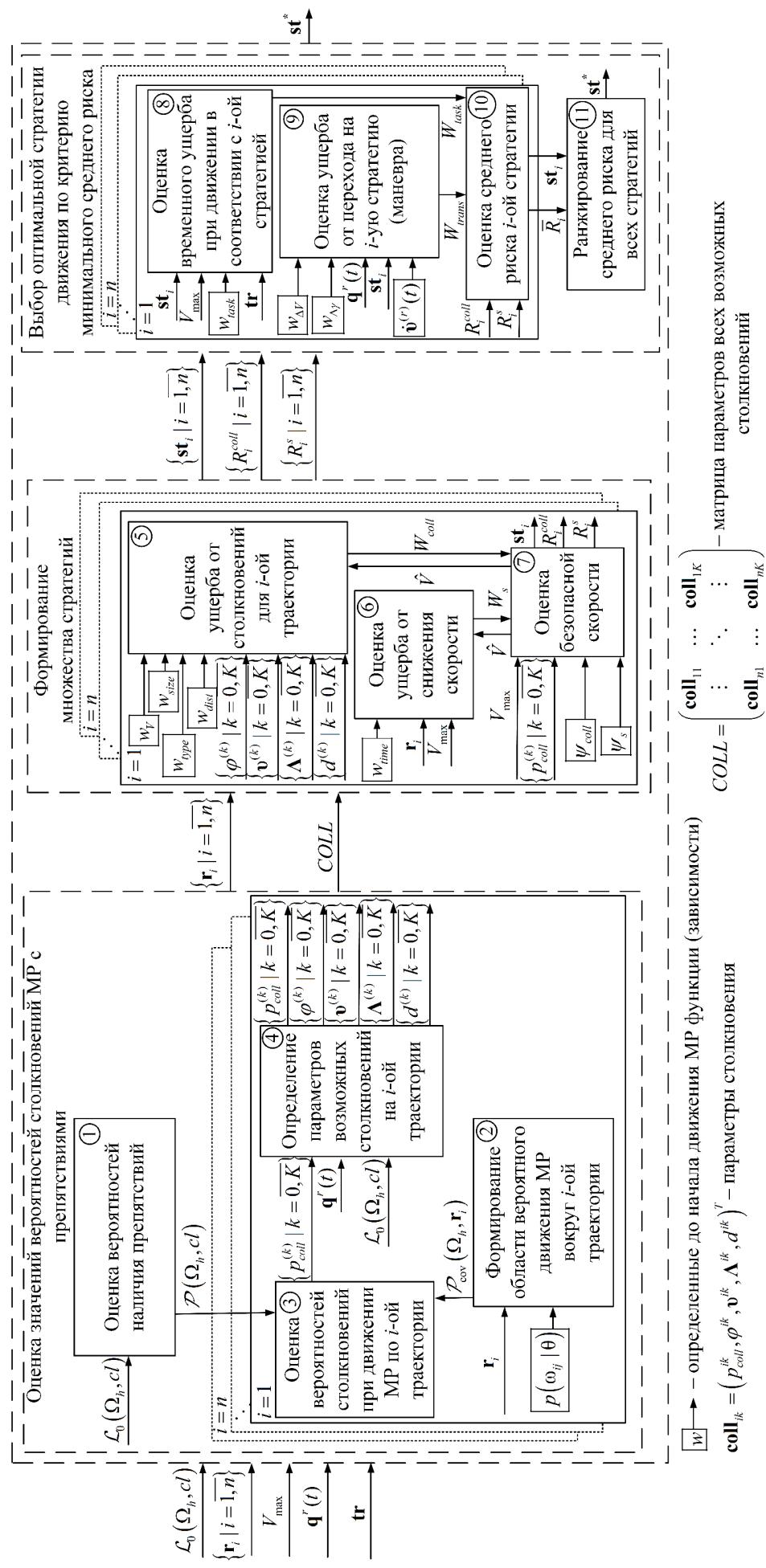


Рис. 2. Функциональная схема метода обеспечения безопасности при автономном управлении движением наземных мобильных роботов

На первом этапе выполняется оценка вероятности столкновения МР с препятствиями для каждой из доступных траекторий движения. Блок 1 проводит анализ результирующего слоя $\mathcal{L}_0(\Omega_h, cl)$ и осуществляет построение многослойной карты вероятностей наличия препятствий $\mathcal{P}(\Omega_h, cl, lr) = \left\{ \left(p_{ij}, s \right) \middle| p_{ij} = p(t, \omega_{ij}, s), \omega_{ij} \in \Omega_h, s = \overline{0, lr}, lr \in \mathbb{N} \right\}$, где функция $p(\cdot)$ принимает на множестве $\{\omega_{ij} \mid i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\}$ значения в диапазоне $[0, 1]$. Каждый слой карты $\mathcal{P}(\Omega_h, cl, lr)$ содержит значения вероятностей $p_{ij}^{(kp)}$ наличия препятствий типа $\varphi \in CL_{coll}$ в соответствующих клеткам ω_{ij} областях внешней среды. Значение вероятности вычисляется на основе анализа нескольких шагов классификации по слою $\mathcal{L}_0(\Omega_h, cl)$. На kp -ом шаге классификации вероятность $p_{ij}^{(kp)}$ вычисляется следующим образом:

$$p_{ij}^{(kp)} = p_{ij}(\varphi \mid \hat{\varphi}_{kp}) = \frac{p(\hat{\varphi} \mid \varphi) \cdot p_{ij}(\varphi \mid \hat{\varphi}_{kp-1})}{p(\hat{\varphi} \mid \varphi) \cdot p_{ij}(\varphi \mid \hat{\varphi}_{kp-1}) + p(\hat{\varphi} \mid \bar{\varphi}) \cdot p_{ij}(\bar{\varphi} \mid \hat{\varphi}_{kp-1})}, \quad (2)$$

где $\hat{\varphi} \in CL$ – тип (класс) объекта, полученный от информационных средств, $\varphi \in CL_{coll}$ – тип (класс) объекта в действительности.

Блок 2 осуществляет оценку вероятности возможного отклонения МР $P_{\omega_{ij}}^{\text{cov}}$ от спланированной траектории \mathbf{r}_i с учетом координатного закона $p(\omega_{ij} \mid \theta)$, определяемого на основе статистического анализа экспериментальных данных при автономном управлении движением с отключенной системой безопасности, где θ – расстояние от траектории \mathbf{r}_i до клетки карты ω_{ij} .

Блок 3 выполняет в момент времени τ оценку вероятности столкновения МР с препятствием $p_{coll}(t)$ как:

$$p_{coll}(t) = p(\tau \leq t \leq \tau + \delta) = \max_{A_r} \left(p(\omega_{ij} \mid \theta) \cdot p(t, \omega_{ij}) \right), \quad (3)$$

где $p(t, \omega_{ij})$ – вычисленная по формуле (2) вероятность наличия объекта в клетке карты ω_{ij} в момент времени t , A_r – область пространства Ω_h , которую может занимать МР при движении по траектории, δ – горизонт прогноза.

В блоке 4 формируется матрица $COLL$ параметров возможных столкновений МР с обнаруженными препятствиями для каждой доступной траектории движения. Каждый элемент матрицы представляет собой кортеж характеристик потенциального столкновения $\mathbf{coll}_{ik} = (p_{coll}^{ik}, \varphi^{ik}, \mathbf{v}^{ik}, \mathbf{\Lambda}^{ik}, d^{ik})^T$, где p_{coll}^{ik} – вероятность столкновения МР с k -ым препятствием при движении по траектории \mathbf{r}_i , φ^{ik} – тип (класс) k -го препятствия на траектории \mathbf{r}_i , \mathbf{v}^{ik} – скорость движения МР относительно k -го препятствия на траектории \mathbf{r}_i , $\mathbf{\Lambda}^{ik} \in \mathbb{R}^3$ – линейные размеры k -го препятствия на траектории \mathbf{r}_i , d^{ik} – расстояние от МР до k -го препятствия при его движении по траектории \mathbf{r}_i .

Таким образом, в результате первого этапа выполняется количественная оценка параметров возможных столкновений при потенциальном движении МР по каждой траектории из множества $\{\mathbf{r}_i \mid i = \overline{1, n}\}$.

На втором этапе осуществляется оценка безопасной (допустимой) скорости движения МР для каждой доступной траектории множества $\{\mathbf{r}_i \mid i = \overline{1, n}\}$, формируя таким образом множество доступных стратегий $\{\mathbf{st}_i \mid i = \overline{1, n}\}$.

Каждое принятное решение по выбору траектории и скорости движения МР сопровождается возможным возникновением ущербов различной природы. Для количественной оценки значений этих ущербов автором предложено использовать эвристические функции.

В блоке 5 выполняется оценка физического ущерба от потенциального столкновения МР с k -ым препятствием типа $\varphi^{(k)}$ при движении по траектории \mathbf{r}_i в соответствии с выражением:

$$W_{coll}^{(k)}(t) = \frac{w_{type}(\varphi^{(k)}) \cdot w_V(\|\mathbf{v}^{(k)}(t_{coll})\|) \cdot w_{size}(\Lambda^{(k)})}{w_{dist}(d^{(k)})},$$

где $w_{type}(\varphi^{(k)})$, $w_V(\|\mathbf{v}^{(k)}(t_{coll})\|)$, $w_{size}(\Lambda^{(k)})$, $w_{dist}(d^{(k)})$ – эвристические функции, $\mathbf{v}^{(k)}(t_{coll})$ – прогнозируемая скорость МР относительно k -го препятствия в момент потенциального столкновения t_{coll} , $\Lambda^{(k)}$ – габариты k -го препятствия, $d^{(k)}$ – расстояние от МР до точки потенциального столкновения с k -ым препятствием.

Блок 6 обеспечивает оценку ущерба от реакции САУД МР на «ложное» (предсказанное информационной системой, но фактически отсутствующее) столкновение в соответствие с формулой:

$$W_s(t) = w_{time}(t'),$$

где $w_{time}(t')$ – эвристическая функция, t' – величина, на которую увеличивается время движения МР на каждом метре траектории \mathbf{r}_i в результате потенциального снижения скорости.

Блок 7 реализует итерационный поиск безопасной скорости движения МР по траектории \mathbf{r}_i путем проверки выполнения критерия Байеса. Применение критерия Байеса в данном случае обосновывается тем, что на протяжении всего движения МР признаки распознаваемых событий «столкновение» и «отсутствие столкновения» постоянны, а также неизменен подход к оценке ущерба от наступления данных событий. Кроме этого, имеется возможность определить априорные вероятности наступления данных событий в зависимости от комплекса условий внешней среды, в которой МР выполняет движение.

В результате выполнения второго этапа формируется множество стратегий $\{\mathbf{st}_i \mid i = \overline{1, n}\}$ путем оценки значения безопасной скорости движения МР для каждой траектории множества $\{\mathbf{r}_i \mid i = \overline{1, n}\}$.

На третьем этапе проводится оценка безопасности и эффективности (по времени движения МР) каждой стратегии из полученного на втором этапе множества $\{\mathbf{st}_i \mid i = \overline{1, n}\}$ и выбор оптимальной стратегии \mathbf{st}^* .

Блок 8 осуществляет вычисление потенциального временного ущерба при движении МР в соответствии со стратегией $\mathbf{st}_i \in \{\mathbf{st}_i \mid i = \overline{1, n}\}$ по формуле

$$W_{task}(t) = w_{task}(\Delta t),$$

где Δt – оценка значения потраченного времени при движении МР по траектории \mathbf{r}_i с безопасной скоростью V_i по сравнению с движением с максимальной скоростью по оптимальной по времени траектории, построенной при условии отсутствия опасных для МР объектов.

Блок 9 определяет количественное значение потенциального ущерба при выполнении МР необходимого маневра для дальнейшего движения в соответствии со стратегией $\mathbf{st}_i \in \{\mathbf{st}_i \mid i = \overline{1, n}\}$. Смена стратегии движения МР САУД сопровождается изменением траектории и скорости движения МР. В этом случае оценка ущерба выполняется в соответствии с формулой:

$$W_{trans}(t) = w_{\Delta V}(\dot{\mathbf{v}}^{(r)}(t)) + w_{\Delta \gamma}(\Delta \gamma),$$

где $w_{\Delta V}(\dot{\mathbf{v}}^{(r)}(t))$ – эвристическая функция, зависящая от закона изменения текущей скорости до значения V_i в стратегии \mathbf{st}_i , $w_{\Delta \gamma}(\Delta \gamma)$ – эвристическая функция, отражающая зависимость от необходимого изменения ориентации МР $\Delta \gamma$ для перехода на траекторию \mathbf{r}_i (маневра).

Блок 10 производит вычисление значения среднего риска \bar{R}_i , как оценки качества каждой стратегии из множества $\{\mathbf{st}_i \mid i = \overline{1, n}\}$, в соответствии с формулой:

$$\begin{aligned} \bar{R}(\mathbf{st}) = & p(\Psi_{coll}) \cdot \left(\frac{w_{type}(\varphi) \cdot w_V(\|\mathbf{v}(t_{coll})\|) \cdot w_{size}(\Lambda)}{w_{dist}(d)} \right) \cdot Q_1(t) + \\ & + p(\Psi_s) \cdot w_{time}(t') \cdot Q_2(t) + \left(w_{\Delta V}(\dot{\mathbf{v}}^{(r)}(t)) + w_{\Delta \gamma}(\Delta \gamma) \right) + w_{task}(\Delta t) \end{aligned},$$

где $Q_1(t)$ – вероятность ошибки первого рода (допущение САУД аварии), $Q_2(t)$ – вероятность ошибки второго рода (реакция САУД на несуществующую в реальности аварию).

Блок 11 определяет удовлетворяющую условию $\bar{R}(\mathbf{st}^*) \rightarrow \min$ оптимальную стратегию движения МР $\mathbf{st}^*(t) \in \{\mathbf{st}_i \mid i = \overline{1, n}\}$ как:

$$\mathbf{st}^*(t) = \arg \min_{i \in \{1 \dots n\}} \bar{R}(\mathbf{st}_i)$$

Эвристические функции $w_{type}, w_V, w_{size}, w_{dist}, w_{time}, w_{task}, w_{\Delta V}, w_{\Delta \gamma}$ определяют степень влияния параметров $\varphi, \mathbf{v}(t_{coll}), \Lambda, d, t', \dot{\mathbf{v}}^{(r)}(t), \Delta \gamma, \Delta t$ на формирование и выбор оптимальных стратегий в процессе движения МР по маршруту. От выбранной стратегии зависит качество движения МР. В рамках диссертации эвристические функции определены следующим образом: $w_{type}(\varphi) = k_{type} \cdot ind(\varphi)$,

$$w_V(\|\mathbf{v}(t_{coll})\|) = k_V \cdot \|\mathbf{v}(t_{coll})\|, \quad w_{size}(\Lambda) = k_{size} \cdot sz(\Lambda), \quad w_{dist}(d) = k_{dist} \cdot d, \\ w_{time}(t') = k_{time} \cdot t', \quad w_{\Delta\gamma}(\Delta\gamma) = k_{\Delta\gamma} \cdot \Delta\gamma, \quad w_{\Delta V}(\dot{\mathbf{v}}^{(r)}(t)) = k_{\Delta V} \cdot a \quad w_{task}(\Delta t) = k_{\Delta t} \cdot \Delta t, \quad \text{где} \\ ind: CL_{coll} \rightarrow \mathbb{R}, \quad sz: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}, \quad a - \text{ускорение МР.}$$

Таким образом, вектор параметров задается как $\mathbf{Param} = (k_{type}, k_V, k_{size}, k_{dist}, k_{time}, k_{\Delta V}, k_{\Delta\gamma}, k_{\Delta t})^T$.

В третьей главе разработана статистическая имитационная модель движения МР по маршруту для поиска оптимальных значений компонент вектора \mathbf{Param}^* , а также для оценивания качества движения МР при выполнении целевой задачи в автономном режиме управления.

Разработанный метод позволяет адаптировать движение МР в соответствии с предъявляемыми требованиями к качеству выполнения целевой задачи и условиями применения с помощью значений компонент вектора \mathbf{Param} . Для определения значений компонент вектора \mathbf{Param}^* автором предложено решить задачу оптимизации методом Монте-Карло для соответствующей функционалу (1) целевой функции:

$$\hat{J} = M[g_{dist}(T)] + M[g_{dam}(T)] + M[\bar{c}_t(T)] \quad (4)$$

Оценка значений функций потерь (Рис. 3) $g_{dist}(T)$, $g_{dam}(T)$, $\bar{c}_t(T)$, выполнялась на основе полученных по результатам моделирования значений \hat{d}^{TR} , \hat{t}^{TR} , \hat{W}_{coll}^{TR} в сравнении с требованиями к качеству выполнения целевой задачи. Для оценки \hat{J} (4) значениям функций $g_{dist}(t)$, $\bar{c}_t(t)$ сопоставлялось соответствующее значение функции $g_{dam}(t) = \hat{W}_{coll}^{TR}$ с помощью Таблицы 1. Интервалы значений функций $g_{dist}(t)$ и $\bar{c}_t(t)$ в Таблице 1 определяют требования к качеству выполнения целевой задачи, которые в делились на слабые, средние и строгие (W^m, W^s – максимальное и аварийное значения физического ущерба соответственно, L^f – максимальная круговая ошибка при достижении целевой точки, T^o – минимальное возможное время движения по опорному маршруту).

Автором проведено сравнительное имитационное моделирование разработанного метода (МОБ) с известными методом минимальной вероятности (ММВ) (Rios-Martinez J., Spalanzani A., Laugier C.) и методом безопасного управления скоростью (МБУС) для константного, линейного и гиперболического законов ограничения вероятности столкновения (В.И. Кибалов, О. С. Шипитко, Н. С. Коробов, А. С. Григорьев) (Рис. 4).

Анализ полученных при моделировании результатов показал, что разработанный в диссертации метод (для строгих требований при постоянном наличии 3 доступных траекторий движения) позволяет повысить оценочное значение вероятности выполнения МР целевой задачи с 0,28 до 0,71 при одновременном снижении оценочного значения вероятности аварии с 0,72 до 0,29 по сравнению с ММВ (лучший по сравнению с МБУС). Кроме этого, разработанный метод предоставляет возможность на этапе синтеза САУД МР выполнить настройку параметров метода (определить весовые коэффициенты

эвристических функций) в зависимости от предъявляемых требований к целевой задаче, условий применения и вычислительных возможностей бортового вычислителя МР.

Таблица 1
Таблица категорий потерь (качественная шкала потерь Ξ)

	Слабые		Средние		Строгие	
$g_{dam}(T)$	$g_{dist}(T)$	$\bar{c}_t(T)$	$g_{dist}(T)$	$\bar{c}_t(T)$	$g_{dist}(T)$	$\bar{c}_t(T)$
$[0, 0.5W^s)$	$[0, 250L^f)$	$[0, 100T^o)$	$[0, 10L^f)$	$[0, 3T^o)$	0	$[0, T^o)$
$[0.5W^s, W^s)$	$[250L^f, 500L^f)$	$[100T^o, 200T^o)$	$[10L^f, 50L^f)$	$[3T^o, 6T^o)$	$(0, 25L^f)$	$[T^o, 2T^o)$
$[W^s, W^m/6)$	$[500L^f, 1000L^f)$	$[200T^o, 400T^o)$	$[50L^f, 125L^f)$	$[6T^o, 9T^o)$	$[25L^f, 50L^f)$	$[2T^o, 3T^o)$
$[W^m/6, W^m/3)$	$[1000L^f, 2000L^f)$	$[400T^o, 700T^o)$	$[125L^f, 250L^f)$	$[9T^o, 12T^o)$	$[50L^f, 100L^f)$	$[3T^o, 5T^o)$
$[W^m/3, 2W^m/3)$	$[2000L^f, 2500L^f)$	$[700T^o, 1100T^o)$	$[250L^f, 400L^f)$	$[12T^o, 15T^o)$	$[100L^f, 250L^f)$	$[5T^o, 7T^o)$
$[2W^m/3, W^m)$	$[2500L^f, 3500L^f)$	$[1100T^o, 1500T^o)$	$[400L^f, 600L^f)$	$[15T^o, 18T^o)$	$[250L^f, 350L^f)$	$[7T^o, 9T^o)$
W^{\max}	$[3500L^f, \infty)$	$[1500T^o, \infty)$	$[600L^f, \infty)$	$[18T^o, \infty)$	$[350L^f, \infty)$	$[9T^o, \infty)$

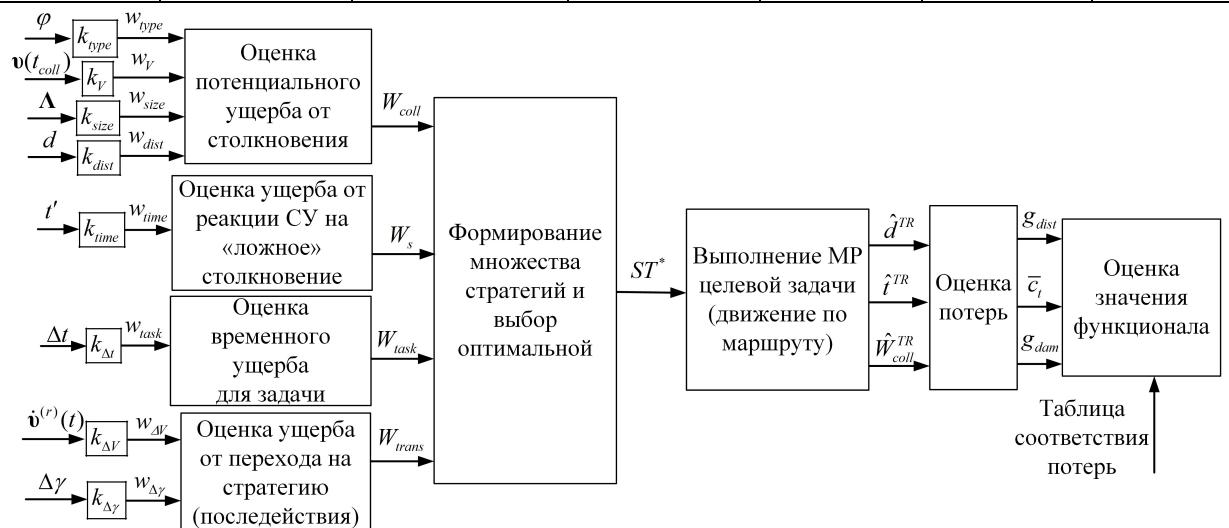


Рис. 3 Схема оценки значения целевой функции (4) (\hat{d}^{TR} – круговая ошибка попадания МР в последнюю точку маршрута, \hat{t}^{TR} – время прохождения опорного маршрута, \hat{W}_{coll}^{TR} – физический ущерб)

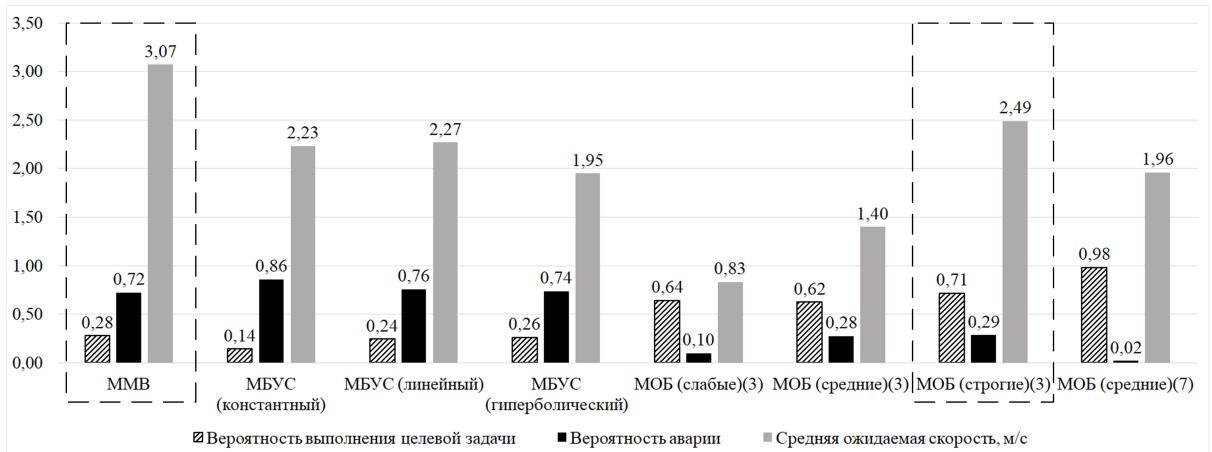


Рис. 4. Результаты статистического имитационного моделирования

В четвертой главе приведено описание программной реализации разработанного метода обеспечения безопасности при автономном управлении движением МР на языке C++ с применением связующего ПО ROS. Программный модуль интегрирован в САУД МР «Пластун», на котором проведены экспериментальные исследования обеспечения безопасности движения.

Перед проведением экспериментальных исследований соискателем был определен координатный закон $p(\omega_i | \theta)$ (3) с учетом динамических характеристик макета МР. Выполнен эксперимент по оценке вероятности столкновения МР с препятствием.

Экспериментальная проверка работоспособности метода обеспечения безопасности при автономном управлении движением МР (при условии строгих требований к качеству выполнения целевой задачи) осуществлялась для двух ситуаций:

1. Внезапное появление препятствия на траектории движения МР.
2. Движение МР в ограниченной области между двумя близкорасположенными препятствиями.

В первой ситуации программный модуль обеспечения безопасности при автономном управлении движением МР вовремя принял решение об остановке, после чего осуществил формирование и выбор новой стратегии движения МР выполнил объезд возникшего препятствия (Рис. 5).

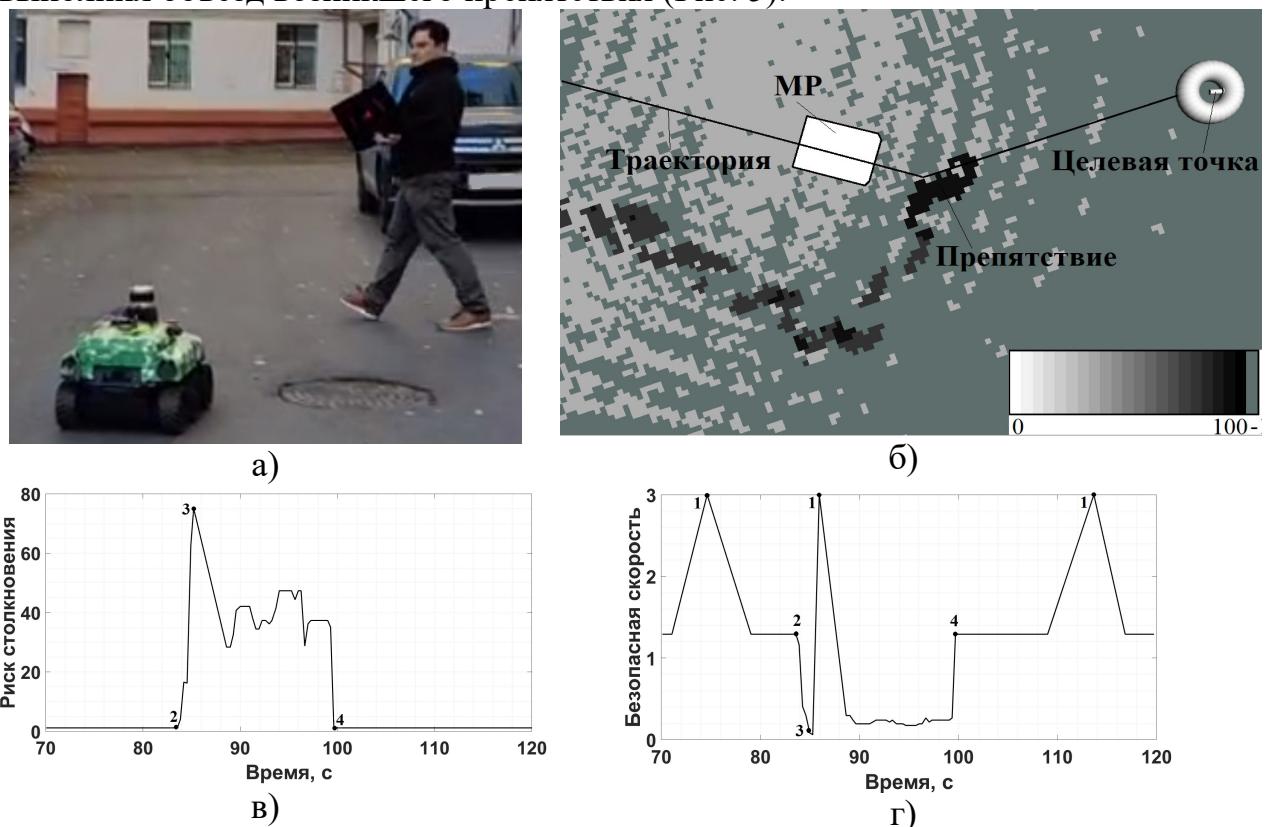


Рис. 5. Движение МР при возникновении препятствия на траектории

В ходе эксперимента программный модуль обеспечения безопасности при автономном управлении движением адекватно проводил оценку безопасной скорости в зависимости от величины риска столкновения МР с препятствием (Рис. 5, в-г).

Во второй ситуации МР выполнял движение в ограниченном пространстве между двумя автомобилями (Рис. 6). Программный модуль обеспечения безопасности при автономном управлении движением осуществлял постоянную оценку безопасной скорости исходя из анализа риска столкновения (Рис. 6, в-г). Благодаря такой оценки МР успешно достиг целевой точки несмотря на сложные условия движения.

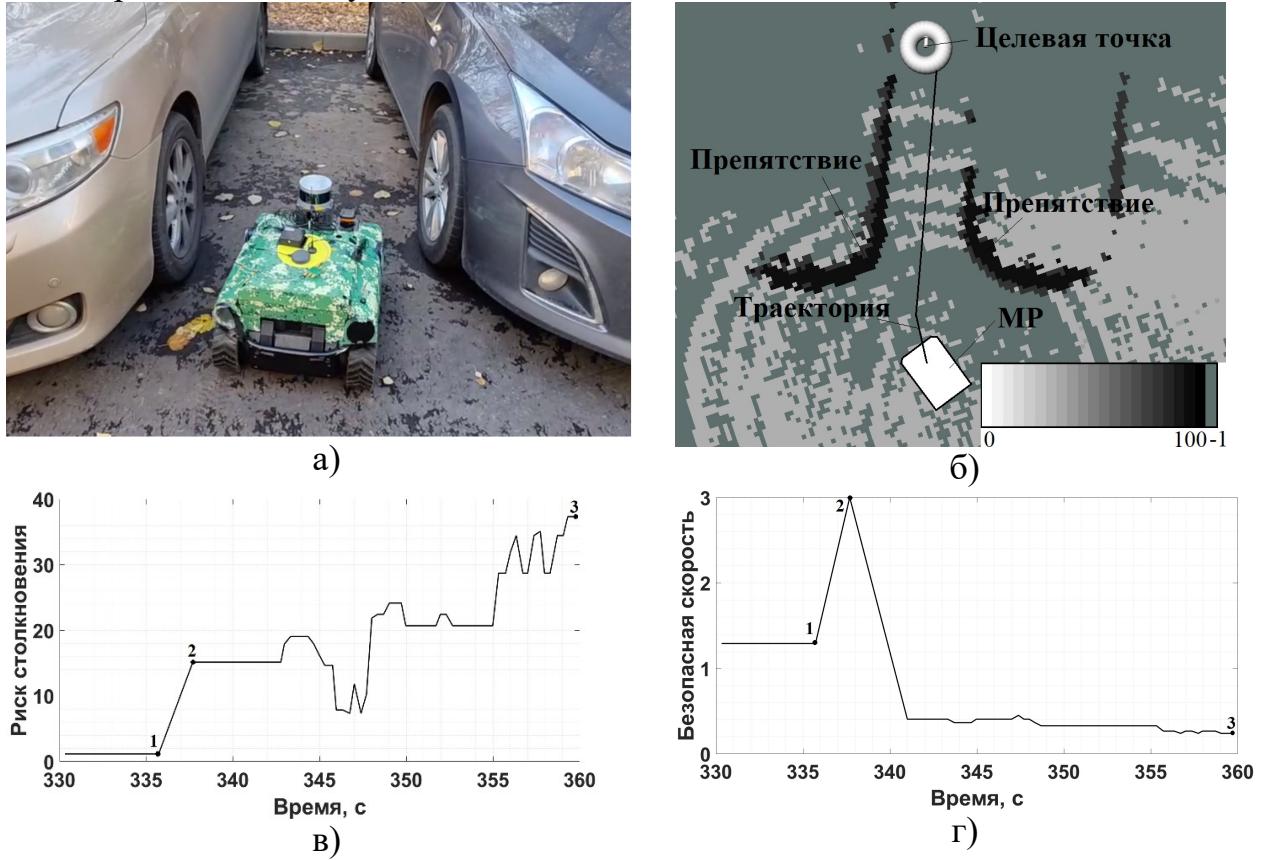


Рис. 6 Движение МР в ограниченном пространстве

Таким образом, программный модуль обеспечения безопасности при автономном управлении движением в процессе проведения эксперимента успешно предотвращал столкновения МР с препятствиями и способствовал выполнению МР целевой задачи (достижения окрестности целевой точки) с заданными требованиями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Разработана методика учета динамических характеристик замкнутого контура управления САУД МР, которая позволяет существенно упростить расчет значения вероятности столкновения МР с препятствием в условиях приближенного к реальному времени, без снижения достоверности оценки.
2. Предложен алгоритм оценки безопасной скорости движения МР для заданной траектории на основе анализа как вероятности столкновения МР с препятствием, так и затрачиваемого времени на движение по рассматриваемой траектории. Алгоритм позволяет учитывать предъявляемые требования ко времени движения МР по опорному маршруту.
3. Предложен метод анализа множества доступных траекторий движения МР в целевую точку, учитывающий риск столкновения МР с препятствиями,

допустимые значения круговой ошибки попадания МР в последнюю точку маршрута и время его прохождения. Метод позволяет обеспечивать выполнение МР целевой задачи с заданными требованиями при допустимом риске столкновения МР с препятствиями.

4. Применение эвристических функций позволяет определять количественные значения потенциальных ущербов различной природы в результате принимаемых САУД решений для предотвращения возможных столкновений. Соотнесение полученных значений ущербов друг с другом позволяет САУД МР принимать оптимальные по времени движения и риску столкновения решения для формирования и выбора стратегии движения.

5. Разработана статистическая имитационная модель движения МР по опорному маршруту. Модель позволяет рассчитать оптимальные значения компонентов вектора **Param**, тем самым адаптируя метод под требования к качеству выполнения целевой задачи и условия применения МР, а также выполнить оценку качества движения МР и сравнительный анализ методов обеспечения безопасного (безаварийного) движения.

6. По результатам проведенного моделирования разработанный в диссертации метод позволил повысить оценочное значение вероятности успешного прохождения МР по опорному маршруту с 0,28 до 0,71 при одновременном снижении оценочного значения вероятности аварии с 0,72 до 0,29 по сравнению с методом минимальной вероятности столкновения.

7. Результаты натурных экспериментов с программной реализацией разработанного метода подтверждают, что метод обеспечивает безопасное движение МР в соответствии с заданными требованиями к качеству выполнения целевой задачи.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТ

1. Тачков А. А., Курочкин С. Ю., Яковлев Д. С. Применение методов искусственного интеллекта в системе автономного управления движением наземных робототехнических комплексов // Двойные технологии. 2023. № 2(103). С. 70-76 (1 п.л. / 0,33 п.л.).

2. Принципы построения систем автономного управления движением наземных робототехнических комплексов специального назначения / Д. С. Яковлев [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. 2022. Т. 10, № 2. С. 121-132. (1,75 п.л. / 0,45 п.л.).

3. Реализация траекторного регулятора наземного робототехнического комплекса на основе модельного прогнозирующего управления / Д.С. Яковлев [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. 2022. Т. 10, № 1. С. 43-54. (1,625 п.л. / 0,35 п.л.).

4. Яковлев Д. С., Тачков А. А. Вероятность столкновения автономного мобильного робота с препятствием // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22, № 3. С. 125-133. (1,25 п.л. / 0,9 п.л.).

5. Iakovlev D. S. Collision Risk Analysis to Ensure the Safety of Autonomous Vehicle Motion Control // Proceedings - 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2021). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2021. Р. 644-649. (0,625 п.л.).

6. Яковлев Д. С., Тачков А. А. Метод обеспечения безопасности беспилотного движения наземных мобильных роботов // Экстремальная робототехника. 2022. Т. 1, № 1. С. 115-122. (0,45 п.л. / 0,4 п.л.).

7. Яковлев Д. С., Тачков А. А. Подсистема обеспечения безаварийного движения мобильного робота // Экстремальная робототехника. 2020. Т. 1, № 1. С. 56-62 (0,7 п.л. / 0,6 п.л.).

8. Яковлев Д. С., Тачков А. А. Задача оценки и обеспечения безопасности наземных робототехнических комплексов // Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем: Материалы III международной научно-практической конференции, посвящённой 110-летию со дня рождения академика Н.А. Пилюгина. Елец. 2019. Том Часть I. С. 409-413. (0,4 п.л. / 0,35 п.л.).

9. Проведение исследований по обоснованию состава комплекса аппаратно-программных модулей для обеспечения режима автономного управления движением наземных робототехнических комплексов легкого класса: Отчет по теме «Логос-ЦРАР-Автономия» / НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Руководитель темы А.А. Тачков. Исполнители Д.С. Яковлев [и др.]. И nv. № 03.04.04-22/53. М., 2020. 180 с.