

На правах рукописи

Бел

БЕЛЯКОВ Федор Юрьевич

**АЛГОРИТМ ГЕНЕРАЦИИ ЛОКАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ
АВТОМОБИЛЯ С УЧЕТОМ ДОРОЖНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ ПО
МАРШРУТУ ДВИЖЕНИЯ**

Специальность 2.5.11. Наземные транспортно–технологические средства и
комплексы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Государственном научном центре Российской Федерации – Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (ФГУП «НАМИ»).

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Евграфов Владимир Владимирович
(ФГУП «НАМИ»)

Официальные оппоненты: **Шмалько Елизавета Юрьевна**
доктор технических наук, старший научный сотрудник в отделе №55 «Управление робототехническими устройствами», отделения №5 «Информационные, управляющие и телекоммуникационные системы и информационная безопасность» ФИЦ ИУ РАН

Макарова Дарья Алексеевна
кандидат технических наук, доцент сектора научной деятельности ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» (Московский политех)

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»**

Защита диссертации состоится «28» октября 2026 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 31.1.008.01 при ФГУП «НАМИ», по адресу: 125438, г. Москва, ул. Автомоторная, д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НАМИ» и на сайте [www.nami.ru](https://nami.ru/directions/scientific-activity/dissertation-council) по ссылке: <https://nami.ru/directions/scientific-activity/dissertation-council>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенные печатью организации, просим направлять по вышеуказанному адресу, ученому секретарю диссертационного совета, а копии присылать на e-mail: rinat.kurmaev@nami.ru

Автореферат разослан «27» августа 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Курмаев Ринат Ханяфиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные тенденции в области автомобильного транспорта направлены на активное внедрение автоматизированных систем управления движением, которые призваны значительно повысить безопасность и комфорт перевозок пассажиров и грузов. Ведущие автопроизводители уже представляют прототипы беспилотных автомобилей и активно интегрируют элементы частичной автоматизации в серийные модели. Широкий интерес к разработке беспилотного транспорта стимулирует рост исследований и разработок в этой области, а также необходимость создания соответствующей нормативной базы. В частности, стандарт SAE J3016 классифицирует автоматизированные системы управления движением (АСУД), выделяя пять уровней автоматизации в зависимости от решаемых задач. Важными аспектами работы АСУД являются оценка окружающей дорожной обстановки и планирование действий транспортного средства с учетом полученных данных. Несмотря на то, что современные системы управления позволяют частично автоматизировать движение автомобиля, их эксплуатация все еще ограничена определенными условиями и требует контроля со стороны человека-водителя. При этом остаются недостаточно изученными многие технические и алгоритмические вопросы, связанные с безопасностью функционирования таких систем. Алгоритмы планирования движения сталкиваются с трудностями в условиях сложной дорожной обстановки. Существующие алгоритмы на высокоточных математических моделях автомобиля являются слишком вычислительно затратными для использования их в реальном времени. Во многих маневрах уклонения от столкновений рассматривается лишь маневр переставки, подразумевающий, что автомобиль движется по прямой дороге, ее изгиб не учитывается. Таким образом, актуальной задачей является совершенствование алгоритмических решений автоматизированных систем управления движением беспилотных и высокоавтоматизированных автомобилей и устранение перечисленных недостатков, чему и посвящена настоящая работа.

Степень разработанности темы исследования.

В России основателем исследований в области автоматизированных систем управления движением автомобилей (АСУД) является доктор технических наук, профессор А.А. Юрчевский, сформировавший в 1975 году новое направление в теории автомобиля, связанное с внедрением в автомобиль систем автоматического управления движением на основе средств технического зрения. В последующем значимый вклад в развитие теории и практики автоматизации управления движением автомобилей внесли отечественные специалисты: М.В. Нагайцев, С.В. Бахмутов, В.В. Евграфов, И.А. Куликов, П.А. Васин, К.С. Яковлев, А.А. Андрейчук, Д.В. Ендачев, иностранные специалисты: Steven M. LaValle, Claire J. Tomlin, Sebastian Thrun, Seth Teller, а также научные коллективы ФГУП «НАМИ», ФИЦ ИУ РАН, ведущих технических университетов и промышленных компаний ведущих зарубежных

стран и Российской Федерации.

Проведенный анализ показывает, что существующие подходы к генерации траектории движения беспилотного автомобиля обладают следующими существенными недостатками и ограничениями в контексте задач, рассматриваемых в диссертационной работе:

- недостаточно строгий учет геометрических и динамических ограничений автомобиля (кривизна траектории движения, поперечное ускорение, габариты) при гарантированном удержании в границах полосы движения;
- необходимость многоступенчатой обработки (поиск пути, сглаживание, последующая проверка) без единой формализованной выпуклой постановки, что усложняет анализ и настройку алгоритмов;
- ограниченные возможности по явному учету свободного пространства и статичных препятствий в рамках решения единой задачи оптимизации, пригодной для реализации в режиме, близком к реальному времени;
- недостаточная апробация алгоритмов в условиях, приближенных к реальной эксплуатации, с использованием как имитационных, так и дорожных испытаний на физическом автомобиле.

Указанные недостатки и ограничения современных систем управления движением беспилотных транспортных средств (БТС) определяют направления развития методов генерации траекторий, лежащих в основе задач, решаемых в настоящей диссертационной работе.

Целью работы является повышение безопасности и качества автоматического движения автомобиля за счет разработки метода и реализующего его алгоритма синтеза локальной траектории движения автомобиля на основе выпуклого квадратичного программирования, обеспечивающих формирование в режиме реального времени гладкой и геометрически допустимой траектории с учетом границ проезжей части, статических препятствий, габаритов автомобиля, ограничений на кривизну и ее производную по дуговой координате.

Предлагаемый алгоритм направлен на обеспечение движения в пределах заданной полосы с возможностью маневра безопасного перестроения, на снижение изменений кривизны траектории и поддержание комфортных динамических параметров движения БТС. Построение траектории движения осуществляется на основе параметризованной кинематической модели автомобиля и формулируется как задача выпуклой оптимизации, допускающей эффективное численное решение в рамках ограниченного вычислительного бюджета, соответствующего требованиям к бортовым системам управления. Разрабатываемое решение должно обеспечивать адаптацию движения БТС к криволинейной геометрии дороги, учитывать габариты автомобиля без избыточного увеличения вычислительной нагрузки системы управления движением и демонстрировать устойчивость и применимость при эксплуатации в условиях городской дорожной среды. Для достижения поставленной цели

необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ и классификацию методов и алгоритмов локального планирования и управления траекторным движением высокоавтоматизированных и беспилотных автомобилей; установить ограничения известных подходов при учете геометрии проезжей части, габаритов автомобиля, статических препятствий и динамических ограничений; сформулировать требования к разрабатываемому методу.

2. Обосновать выбор и выполнить адаптацию математических моделей автоматизированного управления движением автомобиля для решения задач локального планирования и траекторного управления в декартовой системе координат и системе координат Френе; сформировать систему геометрических, кинематических и динамических ограничений.

3. Разработать метод и алгоритм синтеза закона траекторного управления автомобилем на основе оптимального управления; сформировать критерий качества, учитывающий точность следования заданной траектории, интенсивность и плавность рулевого воздействия, а также ограничения исполнительного механизма и поперечной динамики автомобиля; выполнить сравнительное исследование законов управления в единых условиях моделирования.

4. Разработать метод и алгоритм синтеза локальной траектории движения автомобиля на основе выпуклой квадратичной оптимизации, включающий формирование допустимого коридора движения с учетом границ проезжей части, статических препятствий и габаритов автомобиля, а также ограничения на кривизну траектории и скорость ее изменения; исследовать влияние параметров функционала и горизонта планирования на качество и вычислительную реализуемость решения.

5. Реализовать разработанные методы и алгоритмы его применения в составе программно-алгоритмического комплекса автоматизированной системы управления движением и провести их имитационную и натурную верификацию на автомобиле «Лада Веста» по показателям точности следования траектории, геометрической и динамической реализуемости, безопасности объезда препятствий и времени вычисления.

Объектом исследования является автомобиль «Лада Веста», оснащенный экспериментальной системой автоматического управления движением, включающей разработанные алгоритмы объезда препятствий в полосе движения с учетом текущей дорожной обстановки.

Методы исследования

Теоретические исследования основаны на методах теории автомобиля, теории автоматического управления, теории оптимального управления, математического моделирования, теории оптимизации и вычислительной математики. Экспериментальные исследования основаны на методах проведения вычислительных экспериментов и дорожных испытаний автомобилей, а также на методах обработки результатов испытаний.

Научная новизна работы:

1. Усовершенствован метод сглаживания опорной траектории движения автомобиля в декартовой системе координат на основе квадратичного программирования, по сравнению с аналогами отличающийся совместной параметрической минимизацией отклонения от опорной линии, кривизны траектории и скорости ее изменения, что позволяет формировать гладкое начальное приближение с заданным соотношением между точностью следования и динамической реализуемостью траектории.

2. Разработан метод формирования допустимого коридора движения автомобиля по данным о границах проезжей части и статических препятствиях, по сравнению с аналогами отличающийся применением карты расстояний и габаритной аппроксимации автомобиля для построения связного выпуклого полигона проходимости и его представления в виде системы линейных ограничений задачи квадратичного программирования.

3. Разработаны метод и алгоритм синтеза локальной траектории движения автомобиля в системе координат Френе в форме выпуклой задачи квадратичного программирования, по сравнению с аналогами отличающийся совместным явным учетом геометрии проезжей части, габаритов автомобиля, ограничений на кривизну и скорость ее изменения, а также применением функционала качества, согласующего точность следования, плавность траектории, соблюдение безопасных интервалов. Реализация в разработанном алгоритме фиксированного горизонта планирования обеспечивает неизменность структуры матриц задачи и предсказуемость времени вычисления.

Теоретическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии научно-методического аппарата локального планирования движения высокоавтоматизированных и беспилотных автомобилей. Сформирована математическая постановка синтеза локальной траектории в системе координат Френе в виде выпуклой задачи квадратичного программирования, обеспечивающая совместный учет границ проезжей части, статических препятствий, габаритов автомобиля, ограничений на кривизну траектории и скорость ее изменения. Разработанные научные и методические положения устанавливают взаимосвязь между формированием допустимого коридора движения и построением гладкой, геометрически и кинематически допустимой траектории и могут быть использованы при дальнейшем развитии методов автоматического управления движением колесных транспортных средств.

Практическая значимость работы:

1. Разработана алгоритмическая схема многоступенчатой генерации траектории, которая предназначена для использования в составе АСУД как типовой шаблон интеграции планировщика, обеспечивающего их воспроизводимую настройку, тестирование и перенос на иные аппаратные платформы.

2. Разработано программное обеспечение, реализующее функцию

управления траекторией движения высокоавтоматизированного и беспилотного автомобиля для отслеживания референсной траектории.

3. Разработано программное обеспечение, реализующее оптимальный способ генерации траектории движения высокоавтоматизированного и беспилотного автомобиля с учетом окружающей дорожной обстановки.

Личный вклад автора состоит в том, что представленные результаты исследования получены автором и при его непосредственном участии. Автором самостоятельно разработаны методы сглаживания опорной траектории, формирования допустимого коридора и синтеза локальной траектории движения автомобиля, алгоритмическая схема многоступенчатой генерации траектории; разработаны и отлажены алгоритмы генерации и следования траектории. Осуществлена программная реализация разработанных алгоритмов; выполнены обработка и анализ данных натурных испытаний; сформулированы выводы и рекомендации по совершенствованию способов генерации траектории для объезда статичных препятствий в полосе движения высокоавтоматизированного и беспилотного автомобиля.

Реализация результатов работы:

1. Результаты исследования используются во ФГУП «НАМИ» в центре «Интеллектуальные системы» при проведении исследований и разработке систем автоматического управления движением автомобилей.

2. Результаты исследования используются в ООО «Инновационный центр КАМАЗ» для построения траекторий при цифровом моделировании пространственного движения перспективных колесных машин, а также отладке алгоритмов управления системой активной безопасности.

На защиту выносятся:

1. Метод сглаживания опорной траектории автомобиля на основе квадратичного программирования с параметрической балансировкой точности следования, кривизны и скорости ее изменения.

2. Метод формирования допустимого коридора движения с учетом границ проезжей части, статических препятствий и габаритов автомобиля.

3. Метод и алгоритм синтеза локальной траектории движения автомобиля в системе координат Френе на основе выпуклой квадратичной оптимизации с дорожными, габаритными и кинематическими ограничениями.

4. Результаты математического моделирования, имитационных и дорожных испытаний, подтверждающие геометрическую и динамическую реализуемость формируемых траекторий, безопасность объезда статических препятствий и вычислительную применимость разработанного метода в режиме реального времени.

Степень достоверности результатов работы.

Достоверность математического моделирования движения высокоавтоматизированного и беспилотного автомобиля и результатов исследования разработанных алгоритмов управления движением подтверждается научной обоснованностью использованных методов, а также

сопоставлением расчетных данных с измерениями, полученными в ходе дорожных испытаний автомобиля.

Достоверность результатов исследования разработанных алгоритмов подтверждается научной обоснованностью использованных методов, а также вычислением оценочных параметров качества выполнения маневров автомобилем и сопоставлением полученных параметров с результатами других исследований.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на конференциях: 120-я международная научно-техническая конференция «Современные задачи и перспективы развития наземных транспортно-технологических машин и комплексов» 23–24 сентября 2024 года в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», доклад: «Алгоритм сглаживания траектории движения беспилотного транспортного средства на основе квадратичной оптимизации»; Международный автомобильный научный Форум (МАНФ–2024) «Научно-технологическое развитие автомобильной промышленности Российской Федерации» 16–17 октября 2024, доклад: «Алгоритм сглаживания траектории движения беспилотного транспортного средства на основе квадратичной оптимизации с учетом проходимого свободного пространства».

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикаций материалов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата технических наук (перечень ВАК, база Scopus, база Web of Science), а также 5 свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка литературы и четырех приложений. Общий объем работы составляет 171 страницу без приложений, включая 47 рисунков и 22 таблицы. Библиография работы содержит 75 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цель, задачи, объект, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, а также сведения о достоверности результатов, апробации и структуре диссертации. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения безопасности автономного движения в городской среде, где требуется строить гладкую, динамически реализуемую и вычислительно эффективную траекторию с учетом границ проезжей части и статических препятствий.

В первой главе выполнен анализ отечественных и зарубежных исследований по локальному планированию и генерации траектории движения автономного транспортного средства. Рассмотрены графовые и решеточные методы, методы на основе выборки, сплайновые и полиномиальные параметризации, нелинейная и выпуклая оптимизация, а также методы, использующие данные обучения. Показано, что практическая значимость задачи связана с высокой долей ДТП, обусловленных человеческим фактором: около 94% серьезных ДТП в США и около 88% ДТП в Российской Федерации. Для условий эксплуатации в Российской Федерации дополнительно отмечен разрыв между фактической эффективностью серийных систем активной безопасности (около 57% предотвращенных типовых столкновений) и потенциально достижимым уровнем порядка 97%.

Установлено, что для бортовой реализации алгоритм локального планирования должен одновременно обеспечивать геометрическую допустимость, отсутствие столкновений со статическими препятствиями, ограничение кривизны и скорости ее изменения, а также предсказуемое время расчета. Дискретные и выборочные методы позволяют получать допустимый путь, но требуют последующего сглаживания; сплайновые и полиномиальные представления не всегда обеспечивают явный контроль зазоров и кривизны; нелинейная оптимизация обладает высокой вычислительной стоимостью и чувствительностью к начальному приближению. В связи с этим для дальнейшей разработки обоснован выбор выпуклой квадратичной оптимизации (QP) в системе координат, связанной с дорогой.

Отдельно показано, что применение координат Френе позволяет перейти от описания движения в глобальной декартовой системе к ограничениям, непосредственно связанным с дорожным коридором, что повышает интерпретируемость постановки и упрощает проверку соблюдения границ полосы. Данное решение также согласуется с требованием повторяемости расчета при работе планировщика на последовательных тактах движения в составе бортовой системы управления реального времени.

Задача формирования траектории приводится к канонической выпуклой

постановке задачи квадратичного программирования:

$$\begin{aligned} \min_{x \in \mathbb{R}^n} \quad & \frac{1}{2} x^T P x + q^T x, \\ \text{s.t.} \quad & l \leq A x \leq u, \end{aligned} \quad (1)$$

где x — вектор переменных оптимизации, $P = P^T \succeq 0$ — матрица квадратичных коэффициентов, q — линейная часть функционала, A — матрица ограничений, l, u — границы ограничений.

Для согласования оптимизационной постановки с геометрией дороги используется система координат Френе, задаваемая относительно опорной траектории $C : s \mapsto (x_r(s), y_r(s), \psi_r(s))$. Положение автомобиля описывается продольной координатой s , поперечным отклонением d и угловой ошибкой e_ϕ .

В системе Френе состояние определяется продольной координатой s , поперечным отклонением d , угловой ошибкой e_ϕ и кривизной κ . Такое представление позволяет задавать дорожные границы и препятствия как ограничения на допустимый диапазон поперечного смещения.

Связь между декартовыми координатами точки (x, y) и параметризацией Френе (s, d, e_ϕ, κ) задается через геометрию опорной траектории:

$$x = x_r(s) - d \sin \psi_r(s), \quad (2)$$

$$y = y_r(s) + d \cos \psi_r(s), \quad (3)$$

$$\psi = \psi_r(s) + e_\phi, \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{\kappa_r(s) + \dot{e}_\phi / \dot{s}}{1 - \kappa_r(s) d}. \quad (5)$$

В этой системе дорожные границы задаются неравенствами $d_{\min}(s) \leq d(s) \leq d_{\max}(s)$, что упрощает включение инфраструктурных ограничений в QP-постановку.

По результатам обзора сформировано методическое основание дальнейшей разработки: допустимый коридор движения строится с учетом дорожной обстановки, а гладкая и динамически реализуемая траектория получается путем решения последовательности задач квадратичного программирования.

На основании проведенной аналитической работы поставлена цель диссертационного исследования, на ее основании сформирован перечень основных задач исследования, обозначен объект исследования.

Во второй главе рассмотрены математические модели автомобиля и алгоритмы следования траектории, используемые при построении контура управления. Введена параметризация траектории по дуговой координате s , выполнена дискретизация моделей и показано, что сплайн-аппроксимация опорной линии позволяет получать непрерывные значения координат, курса и кривизны, необходимые для расчета ограничений и управляющих воздействий.

Для постановки задачи поперечного управления следованием заданной траектории выполняется построение модельно-предективного управления. В качестве модели автомобиля используется линеаризованная модель автомобиля:

$$\dot{\mathbf{x}}_e = A_e(\bar{v})\mathbf{x}_e + B_e\delta + G_e(\bar{v})r^{\text{ref}}, \quad (6)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} e_y & \dot{e}_y & e_\psi & \dot{e}_\psi \end{bmatrix}^T, \quad (7)$$

где e_y — поперечная ошибка, e_ψ — ошибка курса, $\dot{e}_y$ и $\dot{e}_\psi$ — скорости изменения соответствующих ошибок. где член $G_e(\bar{v})r^{\text{ref}}$ обусловлен учетом опорной кривизны траектории через соотношение $\dot{e}_\psi = r - r_{\text{ref}}$ и рассматривается как известное смещение на горизонте прогнозирования.

Для фиксированной скорости v элементы матриц имеют вид:

$$A_e(\bar{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{C_f + C_r}{m\bar{v}} & \frac{C_f + C_r}{m} & \frac{C_rl_r - C_fl_f}{m\bar{v}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{C_rl_r - C_fl_f}{I_z\bar{v}} & \frac{C_fl_f - C_rl_r}{I_z} & -\frac{C_fl_f^2 + C_rl_r^2}{I_z\bar{v}} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$B_e = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{C_f}{m} \\ 0 \\ \frac{C_fl_f}{I_z} \end{bmatrix}, \quad G_e(\bar{v}) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{C_rl_r - C_fl_f}{m\bar{v}} - \bar{v} \\ 0 \\ -\frac{C_fl_f^2 + C_rl_r^2}{I_z\bar{v}} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Дискретизация по времени выполняется с шагом T_s и горизонтом прогнозирования N_p . В реализованной схеме используются $T_s = 0.1$ с и $N_p = 35$, что соответствует длительности горизонта прогнозирования $T_h = N_p T_s = 3.5$ с. Выбор $N_p = 35$ обеспечивает достаточную глубину предсказания для учета предстоящих изменений геометрии опорной траектории при сохранении вычислительной реализуемости алгоритма в режиме реального времени.

Целевая функция MPC формируется как квадратичный функционал, минимизирующий ошибки слежения, величину угла поворота колес и его приращение:

$$J = \sum_{i=0}^{N_p-1} \left(\mathbf{x}_{k+i|k}^T Q \mathbf{x}_{k+i|k} + R_\delta \delta_{k+i|k}^2 + R_\Delta \Delta \delta_{k+i|k}^2 \right), \quad (10)$$

где $Q \succeq 0$ — весовая матрица ошибок состояния, $R_\delta > 0$ и $R_\Delta \succeq 0$ — весовые коэффициенты, задающие штраф за величину угла поворота колес и его приращение соответственно.

В вычислительных экспериментах матрица Q выбирается диагональной, а штрафование $\Delta\delta$ используется для сглаживания управляющего воздействия.

Для генерации локальной траектории использована кинематическая велосипедная модель в координатах Френе:

$$z' = \begin{bmatrix} d' \\ e'_\theta \\ k' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - k_{ref}d) \tan(e_\theta) \\ \frac{(1 - k_{ref}d)k}{\cos(e_\theta)} - k_{ref} \\ u \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где d — поперечное смещение, e_θ — ошибка курса, k — кривизна траектории, u — скорость изменения кривизны по дуговой координате.

Линеаризация этой модели в окрестности опорной траектории обеспечивает переход к QR-постановке, пригодной для расчета в реальном времени.

Динамическая реализуемость траектории обеспечивается ограничениями на кривизну и скорость ее изменения. На малых скоростях предельная кривизна определяется максимальным углом поворота управляемых колес, а на более высоких скоростях — допустимым боковым ускорением:

$$|k| \leq \min \left(\frac{\tan(\delta_{max})}{L}, \frac{a_{ymax}}{v^2} \right). \quad (12)$$

Такая форма ограничений связывает геометрические возможности автомобиля и требования к динамической безопасности.

В главе сопоставлены алгоритмы: чистое преследование (Pure Pursuit, PP), линейно-квадратичного регулятора (LQR) и модельно-предиктивного управления (Model Predictive Control, MPC). Вычислительный эксперимент проводился на S-образной траектории (рисунок 1).

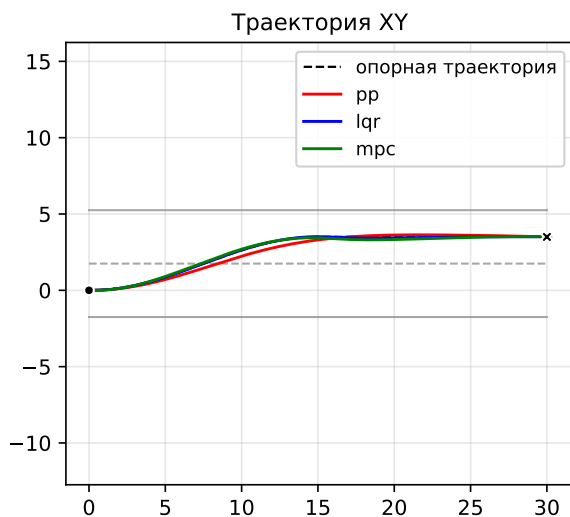


Рисунок 1 – Сравнение алгоритмов PP, LQR и MPC

Вычислительный эксперимент на S-образной траектории при скоростях 3, 5, 10 и 13,88 м/с показал, что LQR обеспечивает наименьшую поперечную ошибку в большинстве режимов, а Pure Pursuit характеризуется минимальными вычислительными затратами. Вместе с тем MPC выбран в качестве базового алгоритма дальнейшей работы, поскольку позволяет явно включить ограничения на угол поворота управляемых колес в единую оптимизационную постановку.

На рисунке 2 показано сравнение показателей алгоритмов на скорости 3 м/с.

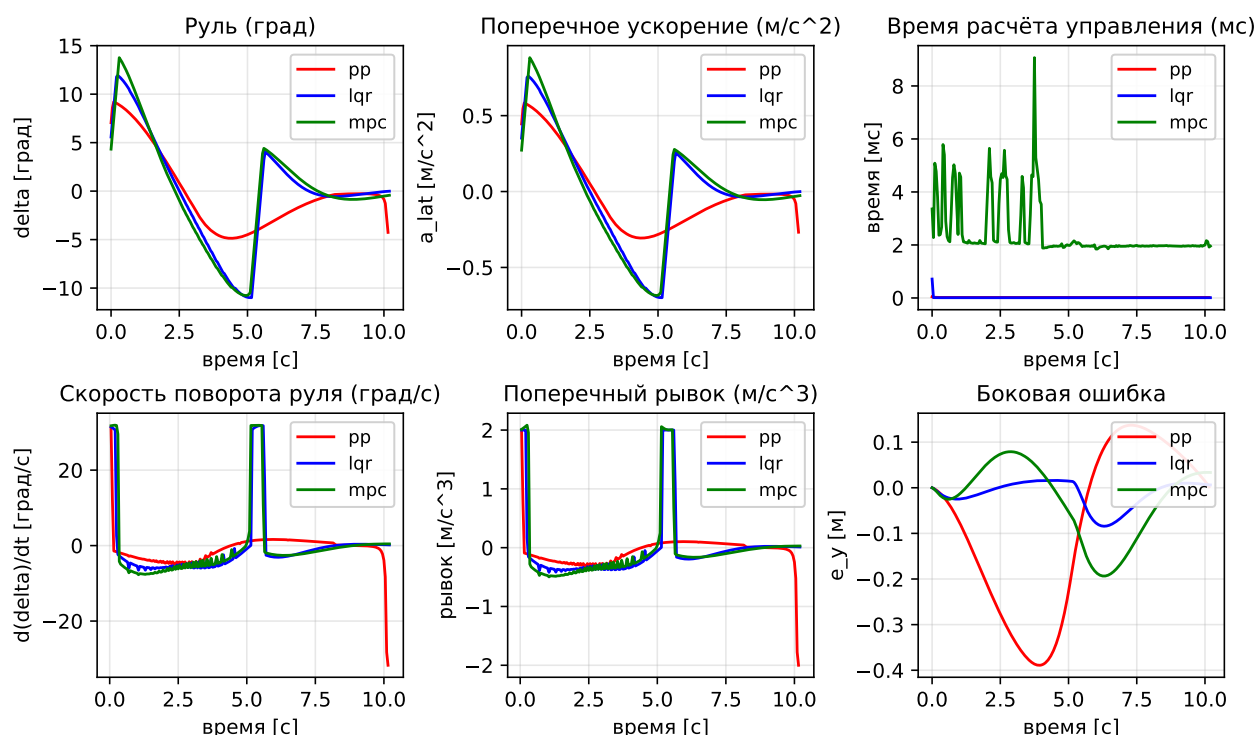


Рисунок 2 – Сравнение алгоритмов PP, LQR и MPC при скорости 3 м/с

При горизонте прогнозирования 35 шагов и шаге дискретизации 0,1 с среднее время расчета управляющего воздействия составило 2,386–2,703 мс, а 95-процентный квантиль — 4,590–5,053 мс, что подтверждает вычислительную реализуемость MPC в режиме реального времени.

В третьей главе разработаны метод синтеза локальной траектории движения автомобиля с учетом дорожной обстановки и реализующий его комплексный многоступенчатый алгоритм. Метод основан на согласованном применении параметрического сглаживания опорной линии, формирования допустимого коридора движения и выпуклой оптимизации траектории в системе координат Френе. Последовательное усложнение математической постановки включает сглаживание опорной линии без учета свободного пространства, введение ограничений по границам дороги и препятствиям на прямолинейных участках, а также формирование траектории на криволинейной дороге с учетом габаритов автомобиля.

Комплексный алгоритм предусматривает предварительную обработку и параметризацию опорной линии, формирование области допустимого движения, представление ее границ системой линейных ограничений, составление и решение задачи квадратичного программирования, а также преобразование полученного решения в декартову систему координат. Входными данными алгоритма являются опорная линия движения, сведения о границах проезжей части и статических препятствиях, габаритные параметры и текущее состояние

автомобиля. На выходе формируется дискретная локальная траектория, пригодная для последующего исполнения контуром следования и удовлетворяющая ограничениям по положению в допустимом коридоре, кривизне, скорости изменения кривизны и безопасному расстоянию до границ свободного пространства. Такое построение обеспечивает согласование геометрической задачи определения допустимой области движения с оптимизационной задачей получения гладкой траектории.

Первой составляющей разработанного метода является усовершенствованный метод сглаживания опорной траектории в декартовой системе координат. Его сущность заключается в совместной параметрической минимизации отклонения формируемой траектории от опорной линии, величины ее кривизны и изменения кривизны между соседними точками. За счет изменения весовых коэффициентов обеспечивается заданное соотношение между точностью следования опорной линии и плавностью получаемой траектории.

Реализующий данный метод алгоритм включает параметризацию исходной центральной линии, заданной дискретным набором точек (x, y) , по дуговой координате s , ее предварительную аппроксимацию кубическим B -сплайном, формирование матриц задачи квадратичного программирования и численное определение координат сглаженной траектории. Целевая функция задачи имеет вид:

$$J = \sum_{i=0}^{N-1} \left(W_d (x_i - x_{ref,i})^2 + W_d (y_i - y_{ref,i})^2 + W_c k_i^2 \right) + \sum_{i=0}^{N-2} W_{cr} (k_{i+1} - k_i)^2, \quad (13)$$

где W_d задает степень следования опорной линии, W_c определяет штраф за величину кривизны, W_{cr} — штраф за изменение кривизны между соседними узлами.

Алгоритм позволяет устранить скачкообразный характер изменения кривизны и получить гладкое начальное приближение. Вместе с тем отсутствие ограничений на свободное пространство не гарантирует соблюдение границ дороги и безопасных расстояний до препятствий, вследствие чего данная постановка используется как первый этап комплексного алгоритма.

На втором этапе постановка расширена посредством введения ограничений, задаваемых верхней и нижней границами допустимого коридора движения. Алгоритм сглаживания дополняется процедурами сопоставления каждой оптимизируемой точки с соответствующим допустимым интервалом и включения полученных интервалов в систему линейных неравенств QP-задачи. При угрозе нарушения границы дороги или пересечения со статическим препятствием траектория отклоняется от исходной опорной линии, а весовые коэффициенты функционала определяют ее форму внутри допустимого пространства.

Данная постановка позволяет согласовать сглаживание траектории с геометрическими ограничениями на прямолинейных и слабо искривленных участках дороги. Для прямолинейного участка с 16 точками и шагом 0,5 м время решения задачи методом OSQP составило 0,16 мс, что подтверждает вычислительную применимость промежуточного алгоритма в контуре реального времени. Вместе с тем представление границ коридора относительно фиксированной декартовой оси ограничивает возможность его использования на участках со сложной криволинейной геометрией.

Для устранения указанного ограничения разработан метод формирования допустимого коридора движения с учетом границ проезжей части, статических препятствий и габаритов автомобиля. Метод основан на построении карты расстояний и последовательном исключении положений транспортного средства, при которых его габаритная область пересекает дорожные границы либо препятствия. В результате формируется связный полигон проходимости, определяющий область, внутри которой может располагаться локальная траектория.

Реализующий метод алгоритм предусматривает формирование дискретной сетки точек в координатах (s, d) и проверку каждой точки на габаритную проходимость. Геометрия транспортного средства аппроксимируется четырьмя перекрывающимися кругами, центры которых располагаются вдоль продольной оси кузова. Для каждого положения автомобиля расстояния от центров кругов до ближайших границ свободного пространства сопоставляются с радиусами кругов. Положения, для которых хотя бы один круг пересекает препятствие или выходит за границы дороги, исключаются из допустимого множества. По границе оставшегося связного множества определяются нижняя и верхняя зависимости допустимого поперечного смещения от продольной координаты.

На основе сформированного коридора разработан метод синтеза локальной траектории в системе координат Френе. Его сущность заключается в представлении положения траектории относительно опорной линии продольной координатой s и поперечным смещением d , вследствие чего криволинейные границы дороги преобразуются в нижние и верхние ограничения на латеральное положение. Полученные ограничения имеют линейный вид и могут быть непосредственно включены в выпуклую задачу квадратичного программирования. Такое представление позволяет учитывать геометрию дороги и габариты автомобиля без перехода к вычислительно более сложной невыпуклой постановке.

Алгоритм синтеза локальной траектории в координатах Френе включает преобразование опорной линии и текущего состояния автомобиля в координаты (s, d) , построение границ допустимого коридора, формирование дискретной модели изменения поперечного положения и кривизны, составление целевой функции и системы ограничений, решение QP-задачи и обратное преобразование полученной последовательности точек в декартову систему координат. Ограничения задачи определяют допустимые значения поперечного

положения, кривизны и скорости изменения кривизны, а переменные слабины используются для сохранения разрешимости задачи при возникновении предельных геометрических условий.

Целевая функция задачи имеет вид:

$$J = \sum_{i=0}^{N-1} (W_d d_i^2 + W_c k_i^2 + W_{safe} \epsilon_{safe,i}^2) + \sum_{i=0}^{N-2} W_{cr} \left(\frac{k_{i+1} - k_i}{\Delta s} \right)^2, \quad (14)$$

где W_d , W_c , W_{cr} и W_{safe} задают соответственно штрафы за поперечное отклонение, величину кривизны, скорость изменения кривизны по дуговой координате и использование переменных слабины.

Введение в функционал взаимосвязанных критериев обеспечивает формирование траектории, согласующей точность следования опорной линии, плавность изменения направления движения и соблюдение безопасных зазоров.

Для повышения безопасности прохождения поворотов предусмотрена модификация функционала, перераспределяющая положение траектории внутри допустимого коридора. В сценарии резкого поворота ее применение позволило увеличить минимальный зазор со стороны внутренней границы приблизительно с 0,25 до 0,80 м при сохранении выполнимости установленных ограничений. Сгенерированные траектории представлены на рисунке 3.

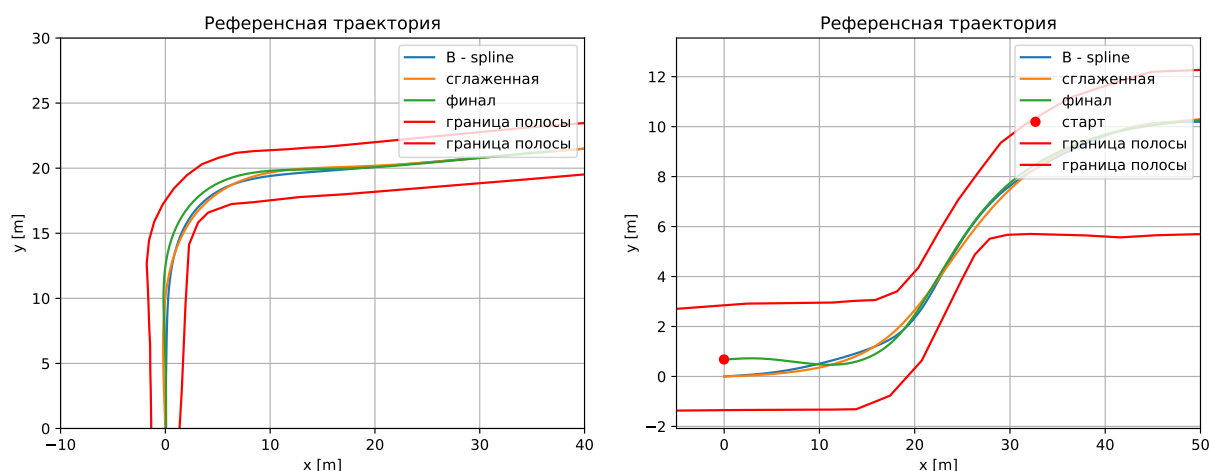


Рисунок 3 – Сглаживание траектории вхождения в поворот по внешней стороне с учетом полосы движения (слева) и с учетом полосы движения на S-образной геометрии (справа)

Во всех рассмотренных сценариях значения $\epsilon_{safe}^{\max}$ близки к нулю, что свидетельствует о соблюдении ограничений без существенного использования переменных слабины. Полученные результаты подтверждают возможность формирования допустимой траектории как на отдельных поворотах, так и на участках с последовательным изменением направления кривизны.

Для учета статических препятствий комплексный алгоритм дополнен процедурой раздельного формирования защитных зазоров относительно границ

проезжей части и объектов, расположенных в полосе движения. Ограничения, сформированные по геометрии дороги и по данным о препятствиях, приводятся к общей системе координат и пересекаются для каждой точки горизонта планирования. После этого уточненные верхняя и нижняя границы поперечного смещения вводятся в QR-задачу без изменения ее общей структуры. В сценарии объезда препятствия на структурированной дороге показана способность алгоритма формировать плавную траекторию с учетом геометрии препятствия, габаритов автомобиля и установленного безопасного расстояния.

Для снижения вычислительных затрат разработана модификация комплексного алгоритма с фиксированным горизонтом планирования. Постоянство числа точек горизонта обеспечивает неизменность размерности задачи и структуры разреженных матриц P и A , что позволяет повторно использовать факторизацию ККТ-матрицы при решении последовательности QR-задач методом OSQP. Для 300 точек время расчета сокращено с 25 до 17 мс, то есть на 32%, а для 100 точек — с 5 до 2 мс, то есть на 60%.

Разработан метод синтеза локальной траектории движения автомобиля и реализующий его комплексный многоступенчатый алгоритм. В составе метода усовершенствован метод сглаживания опорной траектории и разработан метод формирования допустимого коридора движения. Комплексный алгоритм объединяет предварительную аппроксимацию и сглаживание опорной линии, определение габаритно допустимой области движения, представление границ этой области линейными ограничениями и выпуклую оптимизацию траектории в координатах Френе. В отличие от раздельного выполнения процедур сглаживания, проверки свободного пространства и оценки габаритной проходимости, предложенное решение обеспечивает формирование гладкой, геометрически допустимой и кинематически реализуемой траектории в рамках единой алгоритмической схемы, а применение фиксированного горизонта обеспечивает предсказуемость вычислительных затрат и возможность работы на бортовом вычислителе в реальном времени.

В четвертой главе представлены результаты практической верификации разработанных алгоритмов планирования и следования траектории на автомобиле «Лада Веста», оснащенном АСУД. Описана аппаратно-программная платформа, включающая бортовой вычислитель, модули планирования и управления, лидар, камеры, GPS/ГЛОНАСС и инерциальную измерительную систему, интегрированные в среде ROS. Испытания проводились поэтапно: в симуляционной среде и в условиях городской инфраструктуры. Работоспособность и эффективность алгоритмов оценивались по геометрическим зазорам, времени построения траектории и динамическим показателям движения. Безопасность дорожных испытаний обеспечивалась выбором благоприятных условий и присутствием водителя-испытателя.

На рисунке 4 изображен автомобиль «Лада Веста», на котором проводились испытания разработанных алгоритмов генерации и следования траектории движения автомобиля.



Рисунок 4 – Беспилотный автомобиль *Lada Vesta* с установленной системой автономного управления движением

Данная экспериментальная установка служит испытательным стендом для отработки алгоритмов беспилотного вождения в условиях, приближенных к реальной эксплуатации, что позволяет оценить работоспособность разработанных решений до их промышленного внедрения.

В ходе исследований в симуляционной среде Panosim была построена полностью настраиваемая модель автономного транспортного средства и окружающей его инфраструктуры. Сначала, на этапе задания топологии дорожной сети, в Panosim загружается карта местности, в которой задаются не только геометрия дорог и пересечений, но и параметры покрытия, разметки и светофорного регулирования. Затем осуществляется сборка виртуального автомобиля. Выбираются шасси, колесные пары, подвеска и приводы, задаются подключения датчиков и исполнительных механизмов, что позволяет с высокой точностью воспроизвести реальную архитектуру тестируемой платформы. После этого конфигурируются динамические характеристики автомобиля. Задаются масса, моменты инерции, коэффициенты сцепления шин, параметры аэродинамического сопротивления и модели силовых агрегатов, благодаря чему симулятор адекватно отражает поведение машины при маневрировании, ускорении и торможении.

На рисунке 5 представлена траектория, гарантирующая объезд статического препятствия в полосе движения.

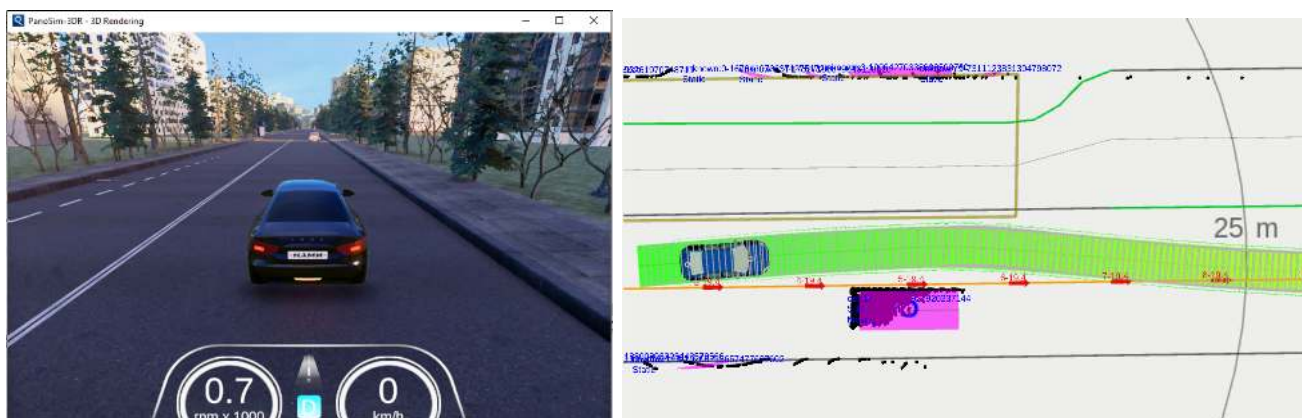


Рисунок 5 – Объезд статического препятствия в полосе движения в симуляторе Panosim

В ходе проведенного эксперимента были получены оценочные численные характеристики сформированной траектории, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Оценочные характеристики траектории, полученные в ходе эксперимента

Показатель	Значение	Примечание
Скорость автомобиля v	43 км/ч (11,94 м/с)	в момент построения траектории
Максимальная кривизна $\kappa_{\max}$	$\approx 0,022 \text{ м}^{-1}$	соответствует маневру уклонения
Минимальный радиус кривизны $R_{\min}$	$\approx 45,5 \text{ м}$	$R_{\min} = 1/\kappa_{\max}$
Минимальное расстояние до границы свободного пространства $\Delta_{\min}$	$\approx 0,45 \text{ м}$	в наиболее стесненной зоне
Максимальное поперечное ускорение $a_{y,\max}$	$\approx 3,14 \text{ м/с}^2$	$a_y = v^2 \kappa$
Поперечное ускорение на прямом участке a_y	0–0,5 м/с ²	вне активного маневра

При скорости движения автомобиля 43 км/ч максимальная кривизна траектории составила приблизительно $\kappa_{\max} \approx 0,022 \text{ м}^{-1}$, что соответствует минимальному радиусу кривизны порядка 45,5 м. Указанные значения свидетельствуют о плавном характере формируемого маневра без резких изменений геометрии траектории. Минимальное расстояние до границы свободного пространства составило около 0,45 м, тогда как с противоположной стороны сохранялся запас порядка 1,3 м. Это указывает на то, что траектория была построена в пределах допустимого коридора движения с сохранением необходимого зазора до его границ. Максимальное поперечное ускорение достигало приблизительно $3,14 \text{ м/с}^2$, что соответствует допустимому уровню

динамической нагрузки и подтверждает физическую реализуемость полученной траектории. На участках, близких к прямолинейному движению, величина поперечного ускорения не превышала $0,5 \text{ м/с}^2$, что дополнительно подтверждает отсутствие избыточных колебаний и устойчивый характер движения.

Виртуальная проверка позволила до проведения дорожных испытаний оценить корректность формирования допустимого пространства, устойчивость решения QR-задачи и согласованность планировщика с контуром управления. Такой этап использован как средство предварительного выявления сценариев, в которых нарушение границ коридора либо превышение динамических ограничений могло бы привести к необходимости перехвата управления, а также как основание для перехода к натурным испытаниям.

Для тестирования в городской среде был выбран маршрут в непосредственной близости от ФГУП «НАМИ».

На рисунке 6 изображена работа системы при проезде по заданному маршруту.

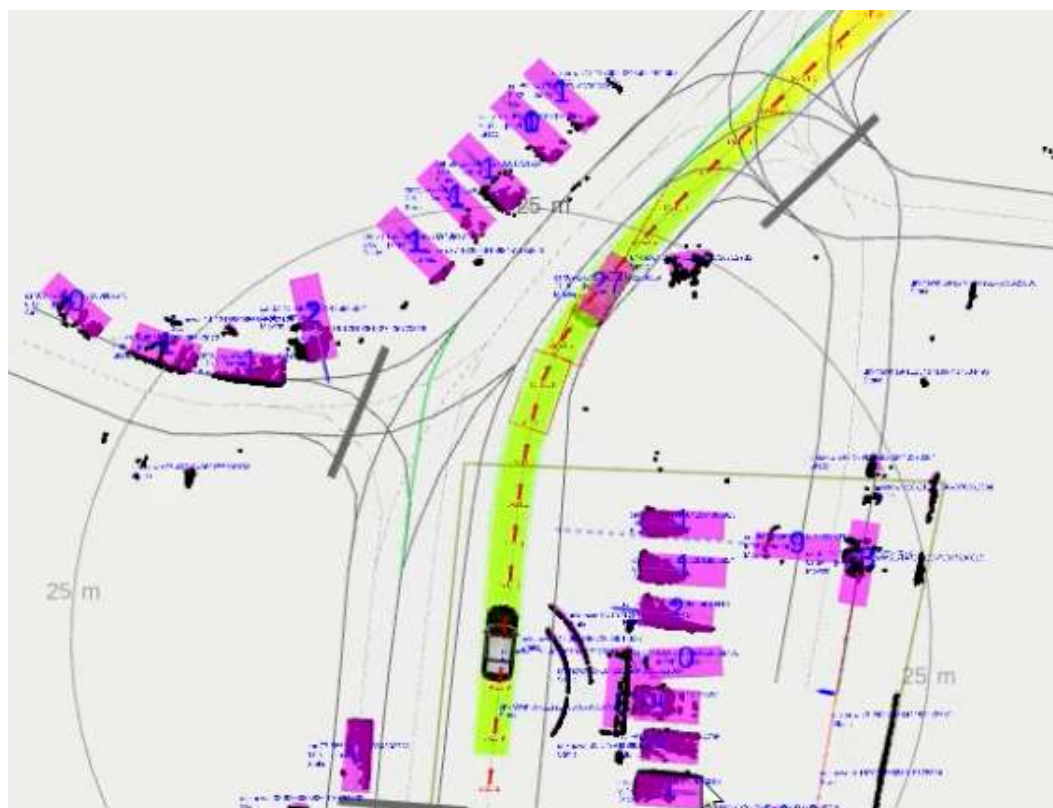


Рисунок 6 – Визуализация работы системы в реальном времени

Для количественной верификации алгоритма построения безопасной траектории дополнительно были выделены эпизоды автономного движения, не содержащие перехвата управления со стороны водителя-испытателя. По указанным эпизодам рассчитывались показатели минимального расстояния до границ допустимого коридора, минимального расстояния до статических препятствий, времени генерации траектории и поперечного ускорения. Результаты сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Количественные показатели работы алгоритма локального планирования траектории по результатам городских испытаний

Показатель	Значение	Примечание
Минимальное расстояние до границы проезжей части	$\geq 0,3$ м	выдерживание допустимого дорожного коридора
Минимальное расстояние до статических препятствий в полосе движения	$\geq 0,5$ м	безопасный объезд препятствия
Среднее время генерации траектории	≈ 50 мс	вычислительная реализуемость в реальном времени
Максимальное по модулю поперечное ускорение	$\leq 2,5$ м/с ²	для выделенных эпизодов автономного объезда

Из данных таблицы 2 следует, что разработанный алгоритм локального планирования в ходе городских испытаний обеспечивал построение траектории, удовлетворяющей одновременно геометрическим, динамическим и вычислительным ограничениям. Во всех рассмотренных эпизодах минимальное расстояние до границ проезжей части сохранялось на уровне не менее 0,3 м, а до статических препятствий, расположенных в полосе движения, — не менее 0,5 м. Среднее время генерации траектории составило около 50 мс, что соответствует частоте порядка 20 Гц и подтверждает возможность применения разработанного алгоритма в контуре управления реальным временем. При этом максимальное по модулю поперечное ускорение для выделенных эпизодов автономного объезда не превышало 2,5 м/с², что свидетельствует о динамической реализуемости формируемых траекторий и их соответствии требованиям плавности движения. Полученные показатели согласуются с целевой постановкой диссертации: алгоритм не только формирует допустимую геометрию траектории, но и сохраняет вычислительный резерв для работы совместно с подсистемами восприятия, локализации и управления. Поэтому результаты городских испытаний рассматриваются как подтверждение применимости предложенной схемы в составе АСУД, а не только как проверка отдельного оптимизационного модуля.

Сравнение алгоритма с альтернативными подходами выполнено по критериям внедрения на реальном автомобиле с использованием результатов обзорного анализа (глава 1) и экспериментальных данных глав 3–4 (таблица 3).

Для количественной интерпретации различий с опубликованными результатами выполнено сопоставление по времени расчета локальной траектории (таблица 4). В качестве значения для разработанного метода использован результат городских испытаний $\bar{t}_{\text{gen}} \approx 50$ мс (таблица 2).

Таблица 3 – Сравнение разработанного метода с альтернативными подходами

Критерий	Граф./решет.	Sampling	NLP	Разработанный метод
Единая постановка с учетом границ полосы, габаритов ТС и статических препятствий	частично; обычно с постобработкой	частично; часто с постобработкой	да	да, в единой QP-постановке
Предсказуемость времени расчета	зависит от дискретизации и эвристик	вариативна	вариативна; сходимость зависит от старта	высокая за счет фиксированного горизонта
Проверка на физическом автомобиле по метрикам безопасности и режима реального времени	как правило, требует отдельной адаптации	как правило, требует отдельной адаптации	ограничена вычислительной стоимостью	подтверждена: $\min dist_{road} \geq 0,3 \text{ м};$ $\min dist_{obs} \geq 0,5 \text{ м};$ $\bar{t}_{gen} \approx 50 \text{ мс}$

Таблица 4 – Количественное сопоставление с опубликованными решениями

Источник	Сопоставляемый показатель	Значение в статье	Результат работы	Отличие
Li et al. (GPM)	Время расчета траектории (17 узлов интерполяции)	0,392 с	0,050 с	быстрее на 87,2%
Li et al. (GPM)	Время расчета траектории (31 узел интерполяции)	0,846 с	0,050 с	быстрее на 94,1%
Dolgov et al. (Hybrid A*)	Полный цикл перепланирования (поиск + сглаживание + интерполяция)	0,050–0,300 с	0,050 с	на уровне нижней границы; до 83,3% быстрее по верхней границе

Таблица 4 показывает, что по метрике времени расчета траектории разработанный метод обеспечивает выраженный выигрыш относительно опубликованного решения на основе гауссова псевдоспектрального подхода: от 87,2% до 94,1% в приведенных конфигурациях. Для *Hybrid A** сопоставление следует трактовать как ориентировочное: в работе Dolgov et al. приведено время полного цикла перепланирования, включающего поиск, сглаживание и интерполяцию, тогда как в данной работе используется метрика среднего времени генерации локальной траектории. Тем не менее, даже в такой постановке разработанный алгоритм находится на уровне нижней границы опубликованного диапазона *Hybrid A** и дает выигрыш до 83,3% относительно его верхней границы.

Поставленная цель диссертационной работы достигнута за счет разработки и экспериментальной верификации методов синтеза локальной траектории и закона траекторного управления автомобилем на основе математического моделирования и выпуклой оптимизации. Разработанные методы обеспечивают формирование и выполнение гладкой, геометрически допустимой и динамически реализуемой траектории в режиме реального времени с учетом геометрии проезжей части, габаритов автомобиля, статических препятствий, ограничений рулевого привода и поперечной динамики. Решение каждой из пяти поставленных задач подтверждено результатами теоретических исследований, вычислительных экспериментов, имитационного моделирования и натурных испытаний автомобиля «Лада Веста».

Рекомендации по применению. Разработанные алгоритмы целесообразно использовать при наличии достоверной локализации, актуальной модели дорожной инфраструктуры и условий движения, соответствующих принятым допущениям о сцепных свойствах покрытия и видимости. При расширении диапазона эксплуатации необходимо фиксировать внешние условия и учитывать их при интерпретации метрик безопасности и плавности. Внедрение разработанных методов и программно-алгоритмического комплекса в другую аппаратную платформу должно сопровождаться повторной настройкой весовых коэффициентов функционала, проверкой ограничений рулевого привода и контрольными испытаниями на сценариях объезда статических препятствий в контролируемой и городской среде.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведены анализ и классификация методов локального планирования и управления траекторным движением высокоавтоматизированных и беспилотных автомобилей. Методы планирования систематизированы с выделением графовых и решеточных, выборочных, параметрических, оптимизационных и обучаемых подходов; методы управления классифицированы на геометрические, линейно-квадратичные и модельно-предиктивные. К основным ограничениям известных подходов отнесены зависимость результата от дискретизации и начального приближения, необходимость сглаживания, вариативность времени вычисления, косвенный учет кривизны и габаритов автомобиля, вычислительная сложность нелинейной оптимизации и затрудненная верификация обучаемых моделей. Геометрические и линейно-квадратичные регуляторы ограниченно учитывают характеристики рулевого привода и поперечной динамики. Сформулированы требования к разрабатываемым методам: требуется совместный учет геометрии дороги, габаритов автомобиля, статических препятствий, кинематических и динамических ограничений; гладкость и реализуемость траектории; предсказуемое время вычисления и работа в реальном времени. Обосновано применение координат Френе и выпуклой квадратичной оптимизации. На

основании проведенной аналитической работы поставлена цель диссертационного исследования, на ее основании сформирован перечень основных задач исследования, обозначен объект исследования.

2. Обоснован выбор и адаптирован комплекс математических моделей движения автомобиля для локального планирования и траекторного управления. Пересчет состояния в глобальном пространстве выполнен по кинематической велосипедной модели в декартовых координатах. Для поперечного управления использована динамическая велосипедная модель, преобразованная к ошибкам следования, линеаризованная относительно опорной траектории и дискретизированная по времени. Для локального планирования получена пространственная кинематическая модель в координатах Френе с состоянием $z = [d, e_\theta, \kappa]^T$ и управлением κ' , определяющим изменение кривизны по дуговой координате. Опорная линия аппроксимирована кубическим В-сплайном для устойчивого определения курса и кривизны. Сформированы ограничения по границам дороги, препятствиям и габаритам автомобиля; кривизне и скорости ее изменения; углу поворота колес и скорости его изменения; поперечному ускорению. Модели и ограничения приведены к форме квадратичного программирования.

3. Разработан метод траекторного управления на основе MPC с линеаризованной дискретной моделью поперечной динамики, описывающей поперечную и курсовую ошибки и скорости их изменения. Критерий качества (квадратичный функционал) учитывает ошибки следования, угол поворота колес и его приращение, обеспечивая баланс точности, интенсивности и плавности управления. Непосредственно заданы ограничения на угол и скорость поворота колес и поперечное ускорение. При горизонте 35 шагов и шаге 0,1 с среднее время вычисления составило 2,386–2,703 мс, 95-процентный квантиль — 4,590–5,053 мс, что подтверждает вычислительную реализуемость в реальном времени. Сравнение Pure Pursuit, LQR и MPC на S-образной траектории при скоростях 3, 5, 10 и 13,88 м/с показало отсутствие регулятора, минимизирующего ошибку во всех режимах: LQR обеспечил наименьшую RMSE при 3, 5 и 13,88 м/с, Pure Pursuit — при 10 м/с; для LQR и MPC при этой скорости RMSE составила 0,038 м. MPC принят в качестве базового метода, так как в разработанной постановке непосредственно минимизирует ошибки следования, величину и приращение управляющего воздействия при одновременном соблюдении ограничений рулевого привода и поперечной динамики. В реализованных вариантах Pure Pursuit и LQR такой совместный учет критерия качества и ограничений не обеспечивается.

4. Разработан метод и алгоритм синтеза локальной траектории на основе выпуклой квадратичной оптимизации. Сначала опорная траектория сглаживается в декартовых координатах путем минимизации отклонения, кривизны и скорости ее изменения. Затем по карте расстояний формируется связный выпуклый полигон допустимого движения, задаваемый линейными

ограничениями с учетом габаритов автомобиля. На заключительном этапе в координатах Френе решается QP-задача с учетом границ коридора, габаритов, кривизны и скорости ее изменения. Функционал согласует точность следования, плавность и безопасные зазоры. Исследовано влияние весовых коэффициентов на отклонение, кривизну и расстояние до границ коридора. В сценарии резкого поворота минимальный зазор со стороны внутренней границы увеличен приблизительно с 0,25 до 0,80 м при сохранении выполнимости ограничений. Фиксированный горизонт и неизменная структура матриц сократили время решения OSQP с 25 до 17 мс для 300 точек и с 5 до 2 мс для 100 точек, соответственно на 32 и 60 %, подтвердив применимость метода в реальном времени.

Основное отличие предлагаемого подхода от ранее выполненных исследований состоит в разработанном способе сопряжения геометрического и оптимизационного этапов локального планирования. На первом этапе по данным о границах проезжей части и статических препятствиях формируется связный допустимый коридор движения с учетом габаритов автомобиля. На втором этапе границы полученного коридора представляются в виде линейных ограничений выпуклой задачи квадратичного программирования, в которой синтезируется траектория с ограничениями на кривизну и скорость ее изменения. Применение модифицированного функционала качества и фиксированного горизонта планирования обеспечивает одновременное соблюдение требований геометрической безопасности, динамической реализуемости и вычислительной эффективности в режиме реального времени.

5. Разработанные методы и алгоритмы реализованы в программно-алгоритмическом комплексе автоматизированной системы управления движением автомобиля «Лада Веста». Комплекс формирует геометрические и динамические ограничения, решает QP-задачи на фиксированном горизонте, генерирует локальную траекторию и управляющее воздействие рулевого привода по данным о дорожном коридоре и препятствиях. Верификация включала вычислительные эксперименты, моделирование в PanoSim и натурные испытания в городской среде. Для MPC значение RMSE поперечной ошибки составило 0,006–0,116 м в зависимости от скорости. При имитации объезда на скорости 43 км/ч получены максимальная кривизна около $0,022 \text{ м}^{-1}$, минимальный радиус 45,5 м, минимальный зазор 0,45 м и максимальное поперечное ускорение $3,14 \text{ м/с}^2$, не превышающее установленного ограничения. В натурных испытаниях расстояние от габарита автомобиля до границ дороги составляло не менее 0,3 м, до препятствий — не менее 0,5 м; среднее время генерации траектории — около 50 мс, максимальное поперечное ускорение — не более $2,5 \text{ м/с}^2$, продольное ускорение при объезде — приблизительно от $-0,9$ до $+1,2 \text{ м/с}^2$. Результаты подтвердили точность управления, реализуемость траекторий, безопасность объезда статических препятствий и вычислительную применимость комплекса в реальном времени.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Беляков Ф. Ю., Евграфов В. В. Алгоритм сглаживания траектории движения беспилотного транспортного средства на основе квадратичной оптимизации // Труды НАМИ. 2025. № 3 (302). С. 54–60. EDN: AIPWTJ. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**
2. Беляков Ф. Ю., Евграфов В. В. Анализ методов построения траектории в зависимости от текущей дорожной обстановки // «Автомобильная промышленность». 2025. № 11. С. 17-20. EDN: AXCKBV. DOI: 10.36652/0005-2337/2025-11-17-20. **Издание входит в перечень Chemical Abstract и приравнивается к перечню ВАК РФ.**
3. Беляков Ф.Ю., Евграфов В.В. Алгоритм сглаживания траектории движения беспилотного транспортного средства на основе квадратичной оптимизации с учётом ограничений на границы дороги // Известия МГТУ «МАМИ». - 2025. - Т. 19. - №3. - С. 156-163. EDN: HWJOKW. doi: 10.17816/2074-0530-689704 **Издание входит в перечень ВАК РФ.**
4. Евграфов В.В., Кондратьев К.Л., Редин Д.И., Ендачев Д.В., Беляков Ф.Ю. Основные принципы применения комбинированных цифровых карт для высокоавтоматизированных транспортных средств. Московский транспорт. Наука и проектирование. 2025;(4):9-17. EDN: PZIYTH.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. № 2025660428. Программа поиска и формирования безопасной траектории для параллельной парковки беспилотного транспортного средства с учетом угла поворота руля в каждый момент времени / Мамонтов Н.В., Беляков Ф.Ю., Кондратьев К.Л. // Роспатент, 2023. EDN: NNIEJW.
2. № 2023685666. Программа поиска и формирования безопасной траектории для перпендикулярной парковки беспилотного транспортного средства с учетом угла поворота руля в каждый момент времени / Мамонтов Н.В., Беляков Ф.Ю., Кондратьев К.Л. // Роспатент, 2023. EDN: YERTVU.
3. № 2023685665. Программа прогнозирования столкновений беспилотного автомобиля с препятствиями на пересекающихся курсах в пространственно-временных координатах / Беляков Ф.Ю., Ахмедов А.И., Кондратьев К.Л., Селезнев Д.С. // Роспатент, 2023. EDN: KANMXH.
4. № 2025660429. Программа для эвм «класс для поиска и построения безопасной траектории для выполнения манёвра минимального риска» / Ахмедов А.И., Мамонтов Н.В., Селезнев Д.С., Зайцев С.А., Беляков Ф.Ю. // Роспатент, 2025. EDN: AFBEDM.

5. № 2025660428. Программа построения прогнозной траектории участников дорожного движения на основе данных цифровой векторной карты и данных о предыдущих положениях объектов / Мамонтов Н.В., Селезнев Д.С., Кондратьев К.Л., Беяков Ф.Ю. // Роспатент, 2025. EDN: OAMDUL.