На правах рукописи

УЛЬЧЕНКО Иван Алексеевич

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ КОЛЕСНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

Специальность: 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

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 технических наук, **Куликов Илья Александрович** (ФГУП «НАМИ»)
Официальные оппоненты:	**Косицын Борис Борисович**, доктор технических наук, доцент кафедры «Колесные машины», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
	Баулина Елена Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Наземные транспортные средства» ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет» (Московский Политех)
Ведущая организация:	**ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» (МАДИ)**

Защита состоится «14» сентября 2022 г. в 13^{00} часов на заседании диссертационного совета Д 217.014.01 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 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 «01» июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент Курмаев Ринат Ханяфиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. По всему миру в результате дорожно-транспортных происшествий (ДТП) ежегодно погибают около 1,3 миллиона человек. В 2020 г. Генеральная Ассамблея ООН приняла резолюцию, в которой определяется цель: к 2030 г. сократить вдвое глобальное число смертей и травм в результате ДТП. Уменьшить количество аварий, травм и жертв позволяют системы безопасности автомобиля, которые подразделяют на системы пассивной и активной безопасности. Как показывают исследования, системы активной безопасности (САБ) являются вторым по эффективности средством сохранения жизней и здоровья пассажиров и водителя, уступая только ремням безопасности.

САБ можно разделить на традиционные, целью которых является обеспечение управляемости и курсовой устойчивости автомобиля, и системы нового поколения, работа которых направлена на предотвращение столкновений автомобиля с другими участниками дорожного движения или элементами дорожной обстановки. Патентный поиск по теме САБ, предотвращающих столкновения, показывает, что с 2013 г. наблюдается заметный рост количества зарегистрированных патентов. На основе статистики ДТП, поставленных государствами и международными организациями целей в области безопасности дорожного движения, а также увеличения числа регистрируемых патентов можно сделать вывод, что исследование и развитие САБ, предотвращающих столкновения, является важной и актуальной задачей.

Целью работы является повышение активной безопасности автомобилей путем совершенствования алгоритмов предотвращения столкновений. Для достижения этой цели необходимо решить следующие **задачи**:

1) провести анализ исследований в области САБ автомобиля, целью которых является автоматическое предотвращение столкновений при помощи маневрирования;

2) провести сравнительный анализ математических моделей динамики автомобиля на предмет применимости в исследованиях и разработках САБ, предназначенных для экстренного автоматического маневрирования; разработать способ настройки параметров модели на основе экспериментальных данных с применением методов оптимизации, выработать критерий для оптимизации;

3) разработать алгоритмы управления движением автомобиля для выполнения экстренных маневров на основе оптимального управления и геометрических регуляторов, выполнить настройку параметров регуляторов с использованием методов оптимизации;

4) разработать критерии оценки выполнения экстренных маневров при помощи алгоритмов автоматического управления движением автомобиля;

5) исследовать работоспособность и эффективность разработанных алгоритмов посредством математического моделирования и физических экспериментов.

Научная новизна

1. Предложен новый метод исследования и разработки алгоритмов предотвращения столкновений на основе нелинейного модельно-прогностического

управления. В методе используется оригинальный критерий оптимизации, обеспечивающий максимальную интенсивность маневров, минимальную колебательность переходного процесса, стабилизацию автомобиля в полосе движения и учет снижения нормальных реакций на колесах автомобиля для предотвращения его опрокидывания. Применение метода позволяет рассчитывать маневры уклонения от столкновений с определением минимального безопасного расстояния до препятствия и обеспечением высоких показателей качества переходных процессов с учетом различных дорожных условий.

2. Разработаны и исследованы новые виды регуляторов («четырехконтурный» регулятор, «курсовой регулятор с ω_z»), управляющих траекторным движением автомобиля при помощи автоматического поворота рулевого колеса (РК).

3. Предложен новый набор критериев оценки качества выполнения экстренных маневров при помощи автоматических алгоритмов управления.

Практическая значимость работы

1. Разработано программное обеспечение, реализующее автоматическое управление движением автомобиля в реальном времени с применением алгоритмов предотвращения столкновений с другими участниками дорожного движения.

2. Разработано программное обеспечение, реализующее оптимальный метод управления движением автомобиля для выполнения автоматических экстренных маневров.

3. Разработано программное обеспечение, выполняющее оптимальную настройку параметров математических моделей на основе экспериментальных данных.

4. Разработано программное обеспечение, выполняющее оптимальную настройку параметров траекторных регуляторов на основе критериев качества управления.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационного исследования использовались при выполнении следующих научно-исследовательских работ:

1. Прикладное научное исследование в рамках соглашения № 14.624.21.0049 «Разработка и экспериментальная апробация прототипа перспективного беспилотного грузового транспортного средства с электроприводом на базе шасси КАМАЗ с компоновкой без кабины водителя для осуществления логистических перевозок» с Министерством образования и науки РФ в 2017 – 2019 гг.

2. Прикладное научное исследование в рамках государственного контракта № 20412.085R309700.20.002 «Разработка прикладных программ моделирования движения транспортных средств для расчета параметров активной безопасности. Проведение виртуальных исследований движения транспортных средств с интеллектуальными системами активной безопасности в различных критических и экстремальных условиях» с Министерством промышленности и торговли РФ в 2020 г.

3. Прикладное научное исследование в рамках государственного контракта № 21412.087R310700.20.02 «Проведение виртуальных исследований движения транспортных средств с интеллектуальными системами активной безопасности в

различных критических и экстремальных условиях» с Министерством промышленности и торговли РФ в 2021 – 2022 гг.

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.

Объектом исследования является автомобиль «Лада Веста», оснащенный экспериментальной системой автоматического управления движением, включающей разработанные алгоритмы уклонения от столкновений.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод исследования и разработки алгоритмов предотвращения столкновений на основе нелинейного модельно-прогностического управления с оригинальным критерием оптимизации, обеспечивающим максимальную интенсивность маневров, минимальную колебательность переходного процесса, стабилизацию автомобиля в полосе движения и учет снижения нормальных реакций на колесах автомобиля для предотвращения его опрокидывания.

2. Новые виды регуляторов («четырехконтурный» регулятор, «курсовой регулятор с ω_z»), управляющих траекторным движением автомобиля при помощи автоматического поворота РК.

3. Набор критериев оценки качества выполнения экстренных маневров при помощи автоматических алгоритмов управления.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований разработанных алгоритмов автоматического уклонения от столкновений.

Степень достоверности результатов работы. Достоверность математического моделирования движения 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 и сопоставлением полученных параметров с результатами других исследований.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на пяти международных научно-технических конференциях: 7th International Conference on Traffic and Logistic Engineering (ICTLE 2019), Международный автомобильный научный форум МАНФ (2019, 2020, 2021), 112-я Международная научно-техническая конференция Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикаций материалов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата технических наук и в международных базах (Scopus, Web of Science).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, общих результатов и выводов, списка используемых источников и 6 приложений. Общий объем работы составляет 136 страниц без приложений, включая 88 рисунков и 5 таблиц (29 таблиц в приложениях). Библиография работы содержит 120 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации – повышения безопасности автомобилей путем совершенствования алгоритмов работы систем предотвращения столкновений. Дана краткая характеристика САБ, предотвращающих столкновения, сформулированы задачи, которые необходимо решить для их совершенствования. Сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, практическая ценность и положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ САБ, предотвращающих столкновения автомобиля с внешними препятствиями. Рассмотрены САБ двух типов: системы автоматического экстренного торможения и системы автоматического экстренного маневрирования. Последняя представлена в Правилах ЕЭК ООН №79 как «функция рулевого управления в аварийных ситуациях (ФРУАС)», что означает функцию, которая позволяет обнаруживать ситуацию потенциального столкновения и на ограниченный период времени активировать автоматическую систему, осуществляющую управление транспортным средством в целях предотвращения или смягчения последствий столкновения.

Сравнивая управление автомобилем водителем (человеком) и автоматической системой, прежде всего можно отметить, что они функционируют в одной и той же среде и принимают решения на основе одной и той же информации о дорожной обстановке, а также управляют одними и теми же агрегатами и системами автомобиля. Этот факт позволил провести сравнительный анализ характеристик водителя-человека и автоматической системы на основе оценок таких качеств, влияющих на безопасность управления автомобилем, как подверженность аффективным факторам, внимательность, время реакции, навыки контраварийного вождения, качество зрения и поле зрения, максимальная скорость вращения РК. Результаты анализа позволили сделать вывод о перспективности автоматизации выполнения действий, направленных на предотвращение столкновений автомобиля с препятствиями в случае, если водитель не реагирует на опасную ситуацию должным образом.

На основе изучения научных публикаций, посвященных архитектуре автоматических систем предотвращения столкновений, можно выделить их основные общепринятые функциональные блоки: техническое зрение, прогнозирование дорожной ситуации, оценка риска столкновения, взаимодействие с водителем, алгоритм принятия решений, построение опорной траектории, проезд по опорной траектории. Система технического зрения, которая состоит из сенсорной части и алгоритмов анализа изображений или данных другого типа, предназначена для распознавания конфигурации окружающего пространства и внешних объектов. В блоке прогнозирования дорожной ситуации рассчитываются вероятные будущие состояния дорожной обстановки. На основе этих прогнозов

блок оценки рисков анализирует текущую дорожную ситуацию и присваивает ей определенный статус или количественную оценку риска. Кроме того, посредством взаимодействия с водителем оценивается его состояние. Далее на основе выполненных оценок функционирует блок принятия решений, который определяет, нужно ли предупреждать водителя о вероятной опасности столкновения. При наличии запаса по времени или дистанции до столкновения алгоритм предоставляет водителю самостоятельно (или совместно с САБ) справиться с опасной ситуацией. Если человек не предпринимает действий, направленных на предотвращение столкновения, то система может принять решение произвести автоматическое действие – торможение, маневрирование, или их комбинацию. При этом в исследованиях установлено, что чем выше скорость автомобиля и меньше расстояние до препятствия, тем эффективнее для предотвращения столкновения маневрирование или комбинированное действие. В случае принятия решения о применении маневрирования или комбинированного действия производится автоматическое построение опорной траектории. Далее выполняется проезд по построенной опорной траектории при помощи регуляторов траекторного движения. Проезд должен быть осуществлен с определенными показателями качества и без потери устойчивости движения. Наиболее распространенным маневром уклонения является экстренная смена полосы движения. Настоящая работа посвящена исследованию динамических характеристик автомобиля при выполнении маневров уклонения от столкновений под управлением регуляторов, обеспечивающих его движение вдоль опорной траектории. Таким образом, предметом исследования являются алгоритмы проезда по опорной траектории. Методы построения других блоков системы предотвращения столкновений и их функционирование выходят за рамки работы.

Рассмотрены следующие виды регуляторов траекторного движения: регуляторы, основанные на геометрическом методе; линейно-квадратичные регуляторы (англ. linear quadratic regulator, LQR); модельно-прогностическое управление (англ. model predictive control, MPC); нелинейный метод MPC (англ. non-linear MPC, NMPC); релейные регуляторы, использующие скользящие режимы; регуляторы, основанные на нечеткой логике; регуляторы с использованием искусственных нейронных сетей. На основе анализа преимуществ и недостатков описанных методов управления был сделан вывод, что для исследовательских задач настоящей работы наиболее подходящим является метод NMPC, который на сегодняшний день высоко востребован при изучении динамики автомобиля благодаря высоким показателям качества его работы, оптимальности получаемого с его помощью управления и тому, что в его составе используется нелинейная модель движения автомобиля, что является необходимым условием для изучения экстренных маневров с высокой интенсивностью. Однако в силу высокой вычислительной нагрузки, обусловленной сложностью модели и размерностью задачи, которая определяется размерностью вектора управляющей переменной, метод NMPC неприменим для систем, работающих в реальном времени. В этой связи для целей практической реализации в диссертационной

работе изучаются различные типы регуляторов, основанных на геометрическом методе.

При разработке и исследовании систем предотвращения столкновений важной задачей является оценка качества работы траекторных регуляторов, на основании которой выполняется сравнение различных видов регуляторов и определяется их применимость в составе САБ. В этой связи были проанализированы известные критерии качества, характеризующие колебательность и устойчивость маневров уклонения от столкновений, а также критерии безопасности маневров: минимальное безопасное расстояние и время до столкновения.

В рамках анализа достигнутого технического уровня рассмотрены описания систем предотвращения столкновений, реализованных как в виде прототипов, так и в серийных автомобилях, в частности, систем Emergency Steering Assist фирмы Continental, Evasive Steering Support фирмы Bosch, Evasive Steering Assist фирмы Ford и др. Общим недостатком существующих серийных решений являются их ограниченные эксплуатационные условия, которые допускают маневры только в пределах четко размеченной полосы движения, на прямолинейных участках дорог с высоким сцеплением, при скорости автомобиля не более заданного порога (например, 80 км/ч в системе Subaru Eye Sight).

Основной вклад в развитие и изучение систем экстренного автоматического маневрирования внесли Maeda T., Hamid A.Z., Katrakazas C., González D., Amidi O., Soudbakhsh D., Eskandarian A., Ackermann C., Isermann R. Отметим, что отечественные ученые, посвятившие свои работы САБ (Иванов А.М., Кристальный С.Р., Топорков М.А., Бахмутов С.В., Куликов И.А., Дик Д.И., Спинов А.Р.), в основном изучали системы автоматического экстренного торможения. В результате патентного поиска найдены патенты авторов Палагута К.А., Шубникова И.С., Алексеева А.А., в которых в общих чертах даны описания системы экстренного маневрирования. Отечественных исследовательских публикаций, посвященных тематике автоматического экстренного маневрирования, в результате поиска и анализа литературы не обнаружено, что подтверждает актуальность темы настоящей работы.

В результате проведенного анализа публикаций установлены следующие недостатки известных исследований и решений в области систем предотвращения столкновений.

1. Алгоритмы предотвращения столкновений посредством экстренного автоматического торможения, получившие распространение в серийных автомобилях, имеют ограничения эффективности, связанные с минимальной безопасной дистанцией до препятствия. Чем выше скорость автомобиля, тем большую целесообразность приобретает использование экстренного маневрирования вместо экстренного торможения.

2. В известных работах по тематике предотвращения столкновений посредством маневрирования недостаточно внимания уделено маневрам на поверхностях с низким сцеплением, которые являются наиболее критичными с точки зрения обеспечения управляемости автомобиля.

3. В известных работах наблюдается недостаток критериев оценки качества выполнения маневров ухода от столкновения, что ограничивает возможности оценки алгоритмов, осуществляющих такие маневры в автоматическом режиме.

Во второй главе выделены и проанализированы основные виды математических моделей движения автомобиля, которые используются в исследованиях и разработках САБ. Рассмотрены следующие виды моделей: на основе велосипедной расчетной схемы с жесткими шинами (модель 1); на основе велосипедной расчетной схемы с эластичными шинами с линейными характеристиками бокового сцепления (модель 2); на основе велосипедной расчетной схемы с эластичными шинами и нелинейными характеристиками бокового сцепления (модель 3); на основе четырехколесной расчетной схемы с эластичными шинами, нелинейными характеристиками бокового сцепления и учетом перераспределения нормальных реакций в боковой плоскости посредством уравнений статического равновесия (модель 4); на основе четырехколесной расчетной схемы с эластичными шинами, нелинейными характеристиками бокового сцепления и учетом перераспределения нормальных реакций в боковой плоскости посредством динамики бокового крена кузова (модель 5); шестимассовая модель автомобиля (модель 6), отличающаяся от модели 5 воспроизведением динамики вращения колес.

Одним из основных компонентов каждой из перечисленных моделей является рулевое управление, которое в случае системы предотвращения столкновений является автоматизированным. Модель, используемая в настоящей работе, учитывает следующие параметры рулевого управления: передаточную характеристику, связывающую угол поворота РК ($\delta_{\text{р.к.}}$) и углы поворота управляемых колес ($\delta_{\text{к1}}, \delta_{\text{к2}}$); задержку отработки сигнала задания угла поворота РК (чистое запаздывание); максимальную скорость вращения рулевого колеса; максимальные углы поворота управляемых колес; смещение нейтрального положения РК. В работе используется нелинейная передаточная характеристика рулевого управления, полученная в результате стендовых испытаний автомобиля. Результаты проведенных вычислительных экспериментов показали, что задержка отработки сигнала задания угла поворота РК и максимальная скорость вращения РК значительным образом влияют на устойчивость и качество выполнения маневров уклонения от столкновений, в следствие чего учет этих параметров является важным для исследования и разработки систем предотвращения столкновений.

В моделях динамики автомобиля с эластичными шинами и нелинейными характеристиками сцепления для аппроксимации последних использовалась эмпирическая модель шины Magic Formula (англ. досл. «волшебная формула»), предложенная H. B. Pacejka, – в связи с удобством её применения, простотой настройки параметров и высокой точностью аппроксимации характеристик шин на различных опорных поверхностях.

Программная реализация математических моделей была выполнена при помощи языка программирования Python, а также пакета MATLAB/Simulink.

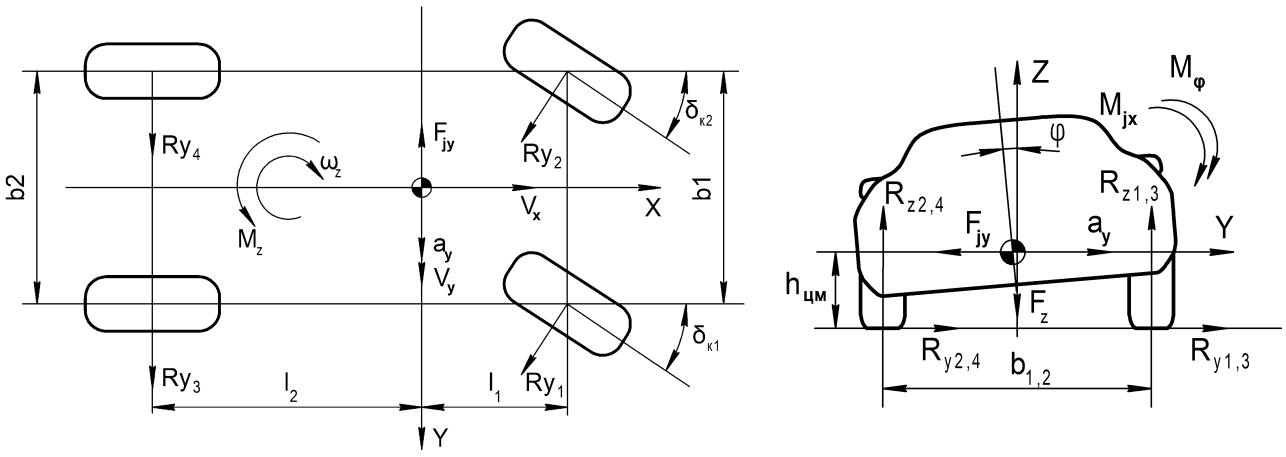
Параметры моделей шины идентифицировались для трех условий движения автомобиля: на сухом асфальте с летними шинами; на сухом асфальте с зимними шинами и на укатанном снегу с зимними шинами. Поиск параметров осуществлялся с помощью градиентного алгоритма оптимизации на основе данных испытательных заездов, воспроизводящих маневры экстренной смены полосы движения переднеприводного легкового автомобиля. При выполнении этих маневров управление углом поворота РК и скоростью автомобиля осуществлялось в автоматическом режиме, что позволило получить результаты с высокой степенью повторяемости. Идентификация параметров модели шины проводилась на основе маневров на сухом асфальте с летними шинами на скоростях от 15 до 100 км/ч, на сухом асфальте с зимними шинами – от 15 до 80 км/ч, на укатанном снегу с зимними шинами – от 15 до 70 км/ч. Скорость автомобиля увеличивалась с шагом 5 км/ч, что позволило идентифицировать параметры модели динамики автомобиля и настраивать параметры системы управления маневрированием в зависимости от скорости автомобиля. Как показали результаты вычислительных экспериментов, введение зависимости параметров модели шины от скорости автомобиля существенно повышает точность результатов моделирования, а введение скоростной зависимости параметров системы управления определяет принципиальную возможность успешного выполнения маневра, а также качество его выполнения.

Оптимизационная идентификация параметров моделей заключалась в поиске минимума следующего предложенного в настоящей работе критерия:

$$J = k_{\omega_z} \cdot \frac{\text{СКО}_{\omega_z}}{norm_{\omega_z}} + k_{a_y} \cdot \frac{\text{СКО}_{a_y}}{norm_{a_y}}, \qquad (1)$$

где $\text{СКО}_{\omega_z}, \text{СКО}_{a_y}$– среднеквадратические ошибки расчета (относительно измерений) моделью скорости рыскания автомобиля ω_z и бокового ускорения a_y; $norm_{\omega_z}, norm_{a_y}$– нормирующие коэффициенты; k_{ω_z}, k_{a_y}– весовые коэффициенты. Критерий основывается на погрешностях расчета (выраженных с помощью СКО) наиболее значимых параметров курсового движения автомобиля – бокового ускорения и скорости рыскания. Представленная структура целевой функции обеспечила наилучшую точность расчета этих параметров по сравнению с рассмотренными функциями других видов.

В результате сравнительного анализа математических моделей динамики автомобиля, который проводился по критериям адекватности, точности, вычислительной нагрузки и функциональности, модель 5 была признана наиболее подходящей для решения задач настоящей работы. Лежащие в ее основе расчетные схемы представлены на рисунке 1. Силовые факторы с индексами «*j*» на этих схемах являются инерционными силами и моментами; F_z – вес автомобиля, M_φ – момент, создаваемый подвесками.



а) б)

Рисунок 1 – Расчетные схемы модели динамики автомобиля:
а) курсовое движение; б) боковой крен кузова

На основании расчетных схем получены следующие уравнения: уравнение боковой динамики автомобиля (2), уравнение вращательной динамики автомобиля относительно вертикальной оси (3), уравнения для расчета углов бокового увода (4, 5) и уравнение бокового крена кузова (6), при помощи которого рассчитывается перераспределение нормальных реакций в боковой плоскости.

$$\begin{cases} m \cdot a_y = m \cdot \left(\dfrac{dv_y}{dt} + v_x \cdot \omega_z\right) = R_{y1} \cdot \cos(\delta_{к1}) + R_{y2} \cdot \cos(\delta_{к2}) + R_{y3} + R_{y4}; & (2) \\ \mathcal{J}_z \cdot \dfrac{d\omega_z}{dt} = R_{y1} \cdot \cos(\delta_{k1}) \cdot l_1 + R_{y1} \cdot \sin(\delta_{k1}) \cdot \dfrac{b_1}{2} + R_{y2} \cdot \cos(\delta_{k2}) \cdot l_1 - & (3) \\ -R_{y2} \cdot \sin(\delta_{k2}) \cdot \dfrac{b_1}{2} - R_{y3} \cdot l_2 - R_{y4} \cdot l_2; & \\ \alpha_{1,2} = -arctg\left(\dfrac{v_{y1,2}}{v_{x1,2}}\right) + \delta_{к1,2}\,; \;\; \alpha_{3,4} = -arctg\left(\dfrac{v_{y3,4}}{v_{x3,4}}\right); & (4, 5) \\ \mathcal{J}_x \cdot \ddot{\varphi} = (R_{y1} \cdot \cos(\delta_{к1}) + R_{y2} \cdot \cos(\delta_{к2}) + R_{y3} + R_{y4}) \cdot h_{цм} - & (6) \\ -(c_{\varphi п} + c_{\varphi з})\varphi - (d_{\varphi п} + d_{\varphi з})\dot{\varphi}, & \end{cases}$$

где m – масса автомобиля; a_y – боковое ускорение центра масс автомобиля; v_x, v_y – продольная и боковая проекции скорости центра масс автомобиля; $R_{y1-4} = f(\alpha_{1-4})$ – боковые проекции касательных реакций опорной поверхности, действующие на переднее правое колесо (индекс 1), переднее левое колесо (индекс 2), заднее правое колесо (индекс 3), заднее левое колесо (индекс 4); $\mathcal{J}_z$ – момент инерции автомобиля относительно оси Z; l_1, l_2 – продольные расстояния от центра масс до передней и задней колесных осей автомобиля соответственно; $b_{1,2}$ – колеи передних и задних колес соответственно; v_{y1-4} – проекции скоростей центров вращения колес на поперечную ось автомобиля; v_{x1-4} – проекции скоростей центров вращения колес на продольную ось автомобиля; углы бокового увода передних (α_{1-2}) и задних (α_{3-4}) колес; $\mathcal{J}_x$ – момент инерции кузова относительно продольной оси;

φ – угол бокового крена кузова; $h_{цм}$ – высота расположения центра масс автомобиля; $c_{\varphi п}$, $c_{\varphi з}$ – угловые жесткости передней и задней подвесок; $d_{\varphi п}$, $d_{\varphi з}$ – коэффициенты демпфирования угловых колебаний передней и задней подвесок. Входными сигналами модели являются угол поворота РК и продольная скорость автомобиля.

На рисунке 2 представлен пример сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными, полученным во время выполнения маневра «переставка» на сухом асфальте с летними шинами при скорости автомобиля 75 км/ч. Траектория автомобиля построена в системе координат «север-восток» для унификации вычислительных экспериментов с дорожными испытаниями, в которых использовалась спутниковая навигация.

Точность моделирования оценивалась при помощи следующих показателей: СКО a_y, СКО ω_z, максимальные абсолютные погрешности по боковому ускорению ($|\max \Delta a_y|$) и скорости рыскания ($|\max \Delta \omega_z|$) автомобиля. По результатам исследования модель 5 показала следующие усредненные характеристики точности. В маневрах на сухом асфальте с летними шинами $|\max \Delta a_y|$=1,04 м/с^2, СКО a_y=18,17%, $|\max \Delta \omega_z|$=0,04 рад/с, СКО ω_z=9,01%; на сухом асфальте с зимними шинами $|\max \Delta a_y|$=1,2 м/с^2, СКО a_y=18,28%, $|\max \Delta \omega_z|$=0,07 рад/с, СКО ω_z=11,61%; на укатанном снегу с зимними шинами $|\max \Delta a_y|$=0,96м/с^2, СКО a_y=26,52%, $|\max \Delta \omega_z|$=0,08 рад/с, СКО ω_z=19,27%.

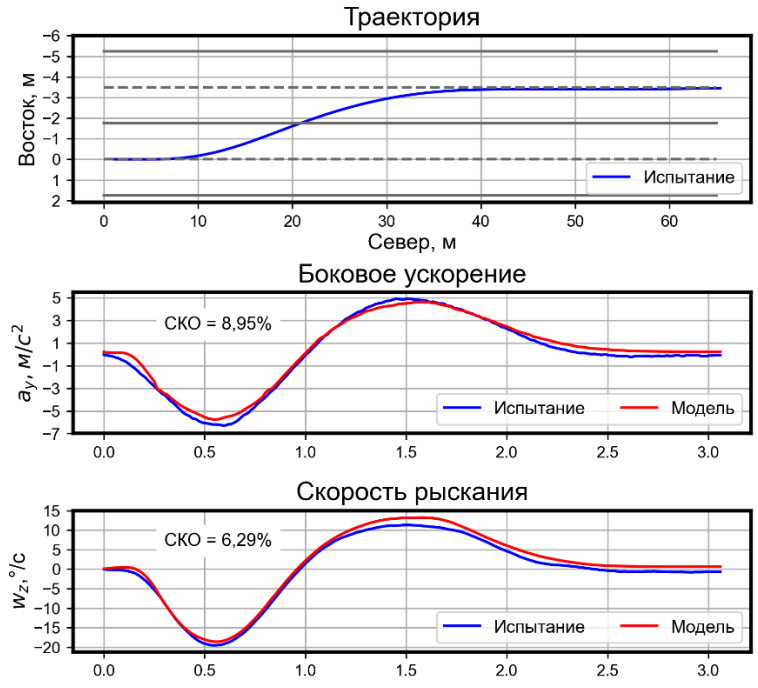


Рисунок 2 – Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными в маневре на сухом асфальте с летними шинами

В третьей главе описаны алгоритмы управления, реализующие функцию уклонения от столкновений. В качестве средства расчета эталонной (оптимальной) программы управления использовался нелинейный модельно-прогностический метод NMPC, в рамках которого была сформулирована следующая задача управления: при постоянной скорости автомобиля выполнить маневр уклонения от столкновения с неподвижным препятствием посредством смены полосы движения (аналог маневра «переставка»), обеспечив минимизацию заданного критерия, отражающего безопасность и качество

выполнения маневра. На рисунке 3 представлена структурно-функциональная схема алгоритма решения сформулированной таким образом задачи с использованием метода NMPC.

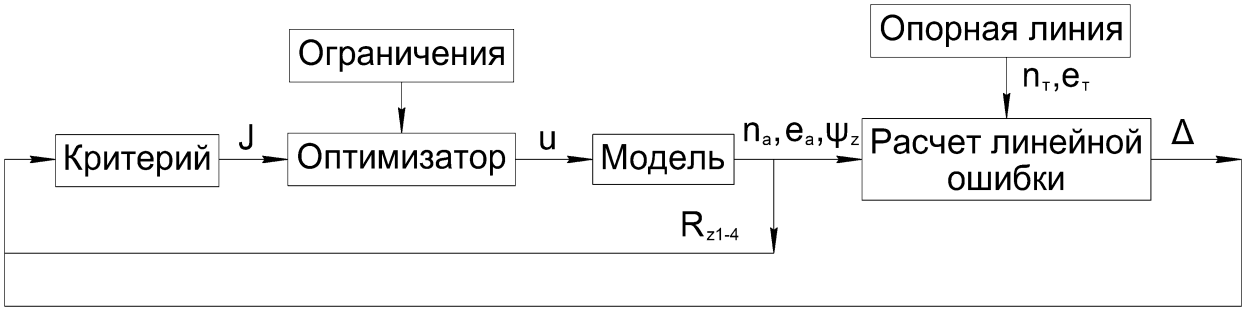


Рисунок 3 – Схема алгоритма расчета управления методом NMPC

Схема включает следующие блоки:

Блок «Модель». В представленной реализации NMPC используется описанная выше нелинейная модель динамики автомобиля (модель 5). Выходными переменными модели являются координаты автомобиля в системе «север-восток» (n_a, e_a), его курсовой угол ψ_z и нормальные реакции опорной поверхности R_{zi}.

Блок «Оптимизатор». Содержит алгоритм поиска минимума целевой функции (критерия качества) с использованием градиентного метода оптимизации. В настоящей работе используется метод последовательного квадратичного программирования. Массив управляющей переменной u содержит значения угла поворота рулевого колеса $\delta_{\text{р.к.}}$ для каждого временно́го шага моделирования и имеет размерность n (суммарное число временных шагов в моделируемом маневре):

$$u = [\delta_{\text{р.к.}1}, \delta_{\text{р.к.}2}, \delta_{\text{р.к.}3} \dots, \delta_{\text{р.к.}n-2}, \delta_{\text{р.к.}n-1}, \delta_{\text{р.к.}n}]. \quad (7)$$

Полученный в результате работы алгоритма массив u является оптимальной программой управления углом поворота РК при выполнении маневра.

Блок «Критерий». Задача оптимизации состоит в том, чтобы минимизировать следующий предложенный в настоящей работе дискретный интегральный критерий качества (целевую функцию):

$$J = \sum_{i=1}^{n} (|\Delta_i| + 70e^{-\left(\frac{R_{z1i}+200}{217,1}\right)^2} + 70e^{-\left(\frac{R_{z2i}+200}{217,1}\right)^2} + 70e^{-\left(\frac{R_{z3i}+200}{217,1}\right)^2} + 70e^{-\left(\frac{R_{z4i}+200}{217,1}\right)^2}), \quad (8)$$

где i – текущий временной шаг, n – общее число временных шагов, равное количеству элементов массива u, $|\Delta_i|$– модуль линейной траекторной ошибки. Четыре экспоненциальных слагаемых участвуют в расчете, если нормальные реакции удовлетворяют условию $R_{zi} < R_{zi}^{\text{гр.}}$, где $R_{zi}^{\text{гр.}}$ – минимально допустимое значение нормальной реакции по условию предотвращения отрыва колеса. Представленная целевая функция состоит из двух частей. Первая часть (компонент $|\Delta_i|$) предназначена для повышения интенсивности маневра (наискорейшее устранение линейной траекторной ошибки), а также для уменьшения перерегулирования и колебательности переходного процесса при смене полосы движения. Вторая часть целевой функции (четыре экспоненциальных слагаемых)

задана в виде кривых Гаусса, которые формируют штрафы за приближение нормальных реакций к заданному граничному значению.

Блок «Ограничения» задает область поиска оптимального управления, границы которой определяются прежде всего конструктивными и физическими ограничениями рулевого управления и входящего в его состав автоматического привода: максимальной амплитудой и максимальной скоростью вращения РК. Кроме того, ограничения формируются условиями выполнения маневра, которые определяют положение РК в начальный и конечный моменты маневрирования.

Блок «Опорная линия». В настоящей работе опорная линия задает целевое положение автомобиля после выполнения маневра экстренной смены полосы движения. Опорная линия строится параллельно курсу автомобиля со смещением на 3,5 м. Подобная геометрия траектории используется в маневре «переставка», описанном в ГОСТ Р 31507-2012 «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость». Выходными переменными блока, являются координаты в системе «север-восток» ($n_т$, $e_т$), задающие расположение опорной линии в плоскости дороги. Следует отметить, что применение опорной траектории в виде прямой линии для маневров смены полосы движения допустимо только на прямолинейных участках дорог. В других случаях необходимо применять опорные траектории с соответствующей кривизной.

Блок «Расчет линейной ошибки». Расчет линейной траекторной ошибки Δ при поиске оптимального управления производится в центре передней оси автомобиля. Δ определяется при помощи расчета длины перпендикуляра, опущенного из этой точки на опорную линию.

В качестве средств траекторного управления, предназначенных для реализации в составе бортовых контроллеров САБ, в настоящей работе рассмотрены и изучены широко применяемые регуляторы, основанные на геометрическом методе: регулятор pure pursuit (англ. «чистое преследование»), траекторный регулятор и различные известные варианты курсового регулятора. Кроме того, в работе предложены новые виды регуляторов, получившие названия «курсовой регулятор с ω_z» и «четырехконтурный регулятор». В своей работе геометрические регуляторы используют т. н. точку обзора, в которой рассчитывается траекторная ошибка Δ_{xobs}. Эта точка лежит на продольной оси автомобиля впереди его центра масс на расстоянии, которое зависит от скорости автомобиля и сцепных свойств опорной поверхности. Использование точки обзора придает управляющим действиям регулятора упреждающий характер и повышает качество управления.

Перечисленные регуляторы можно разделить на два типа. Первый тип в качестве обратной связи использует только координаты и курсовой угол автомобиля, второй тип регуляторов имеет внутренний контур регулирования, в котором в качестве обратной связи используется сигнал скорости рыскания автомобиля. Внутренний контур регулирования позволяет управлять скоростью рыскания, что является необходимым условием реализации равновесных режимов движения, обладающих свойствами устойчивости. К регуляторам первого типа относятся pure pursuit, траекторный регулятор и курсовой регулятор на основе

пропорционально-интегрирующего регулятора (ПИ-регулятора). Ко второму типу относятся курсовой регулятор на основе пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора (ПИД-регулятора), курсовой регулятор с ω_z и четырехконтурный регулятор. Курсовой регулятор с ПИД-регулятором был отнесен ко второму типу, так как Д-звено обеспечивает косвенное управление по скорости рыскания (без непосредственной обратной связи по этому параметру).

Курсовой регулятор с ω_z, структурная схема которого представлена на рисунке 4, является развитием известного курсового регулятора, отличаясь от него тем, что разность $\Delta\psi_z$ курсового угла автомобиля (ψ_z) и угла ориентации опорной линии ($\psi_{z\text{т}}$) преобразуется при помощи блока «Пересчет» в требуемую для выполнения маневра скорость рыскания автомобиля ($\omega_{z\psi}$). Блок «Пересчет» содержит ограниченную по модулю линейную зависимость целевой скорости рыскания $\omega_{z\psi}$ от разности $\Delta\psi_z$. Коэффициент наклона этой функции определяется скоростью автомобиля и типом опорной поверхности. Разность e_{ω_z} между сигналом $\omega_{z\psi}$ и сигналом обратной связи по скорости рыскания автомобиля ω_z поступает на вход ПИ-регулятора. Таким образом, внутренний контур с ПИ-регулятором представляет собой контур регулирования по скорости рыскания автомобиля. Выходом ПИ-регулятора является уставка угла поворота РК ($\delta_{\text{р.к.}}$), которая передается в контроллер нижнего уровня, осуществляющий управление РК при помощи электрического усилителя рулевого управления (ЭУР). Блок «Комплекс. нав. система» означает комплексированную навигационную систему, которая использует данные спутниковой навигации и бортовых измерительных средств автомобиля для определения его пространственного положения и параметров движения, в частности, скорости рыскания.

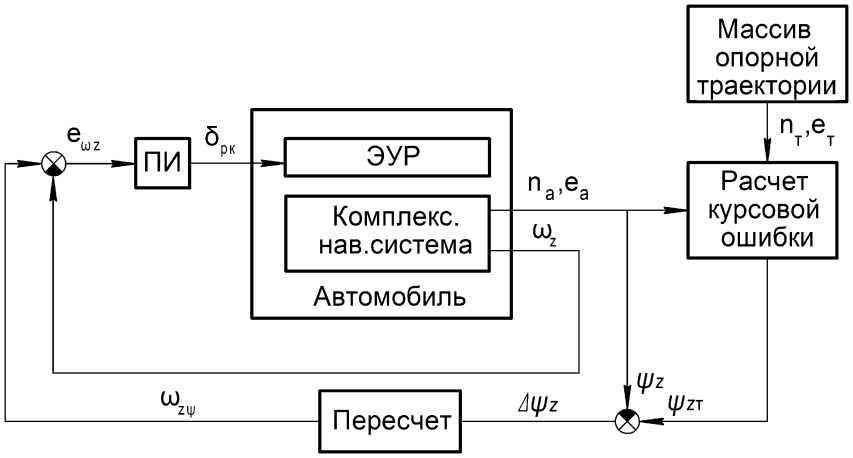


Рисунок 4 – Структурная схема курсового регулятора с ω_z

На рисунке 5 представлена структурная схема четырехконтурного регулятора. Данный регулятор имеет три внешних контура и внутренний контур регулирования с обратной связью по скорости рыскания автомобиля. Внешние контуры регулятора устраняют линейную (Δ_{xobs}) и курсовую (Δ_{ψ_z}) ошибки, а также ошибку отслеживания скорости рыскания, зависящую от геометрии опорной траектории ($\omega_{z\text{т}}$). Линейная и курсовая ошибки преобразуются при помощи блоков «Пересчет» в составляющие целевой скорости рыскания $\omega_{z\Delta}$ и $\omega_{z\psi}$, которые необходимо развить автомобилю,

чтобы устранить эти ошибки. Составляющие целевой скорости рыскания $\omega_{z\text{т}}, \omega_{z\Delta}$ и $\omega_{z\psi}$ поступают в блок сумматора. Для достижения целевой скорости рыскания во внутреннем контуре регулирования используется ПИ-регулятор угла поворота РК ($\delta_{\text{р.к.}}$) с обратной связью по измеренной скорости рыскания ω_z.

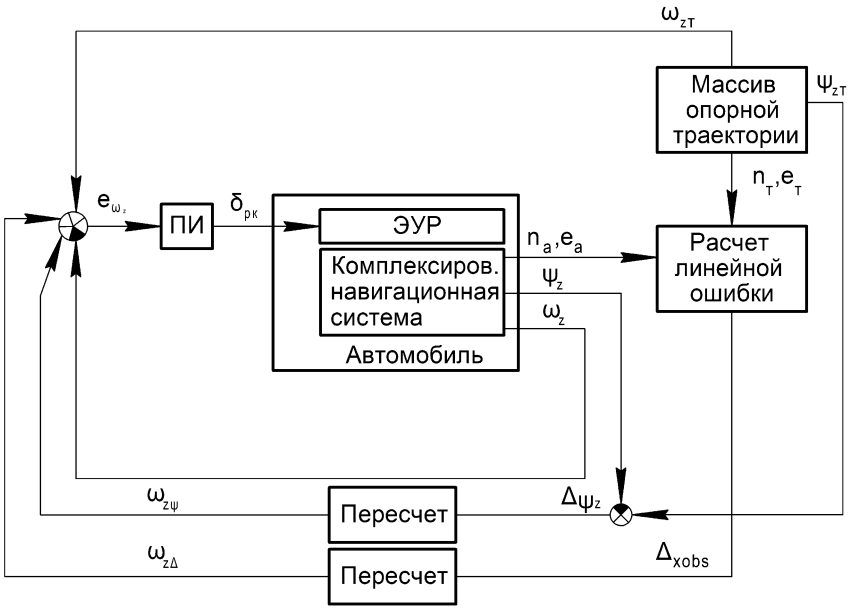


Рисунок 5 – Структурная схема четырехконтурного регулятора

В настоящей работе настройка коэффициентов регуляторов осуществляется при помощи оптимизации с использованием критерия, аналогичного приведенному выше критерию метода NMPC. Результатом настройки регуляторов являются значения их параметров, оптимальные для данного автомобиля, выбранной скорости движения и типа опорной поверхности.

Как было отмечено выше, в известных исследованиях существует недостаток критериев оценки работы траекторных регуляторов при выполнении маневров ухода от столкновений. Для устранения этого недостатка в настоящей работе предложен систематизированный подход с использованием критериев трех типов. К первому типу относится минимальное безопасное расстояние до препятствия ($R_{\text{б}}$), на котором может быть успешно предотвращено столкновение. Его использование позволяет оценивать эффективность работы траекторного регулятора и сравнивать различные методы управления.

Ко второму типу относятся критерии качества выполнения маневра смены полосы движения, которые формулируются при рассмотрении этого маневра как перехода динамической системы из одного установившегося состояния в другое. Это позволяет применять к временно́й диаграмме траекторной ошибки Δ используемые в автоматике параметры оценки переходных процессов, которые иллюстрируются рисунком 6. Параметр быстродействия представляет собой время $t_{\text{б}}$, в течение которого модуль линейной ошибки Δ уменьшается до 0,25 м и не превышает этого значения до конца заезда. При помощи параметров перерегулирования Δ_{h1} (первый экстремум колебательного процесса) и Δ_{h2} (второй экстремум) оценивается точность выполнения маневра, его колебательность и безопасность – удержание автомобиля в полосе и устойчивость его движения.

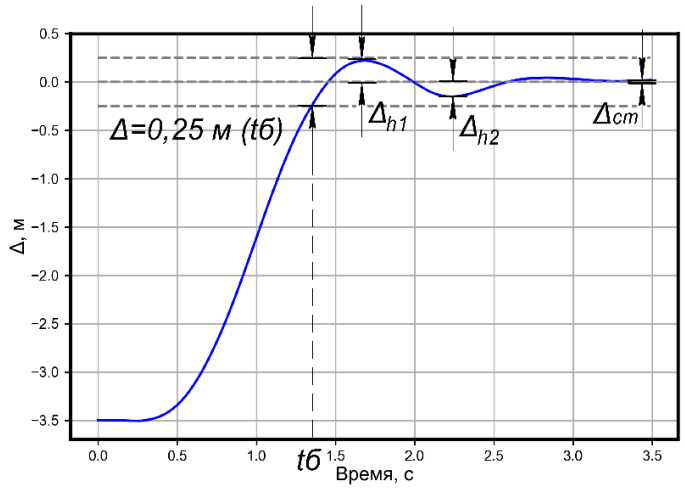


Рисунок 6 – Параметры качества выполнения маневра

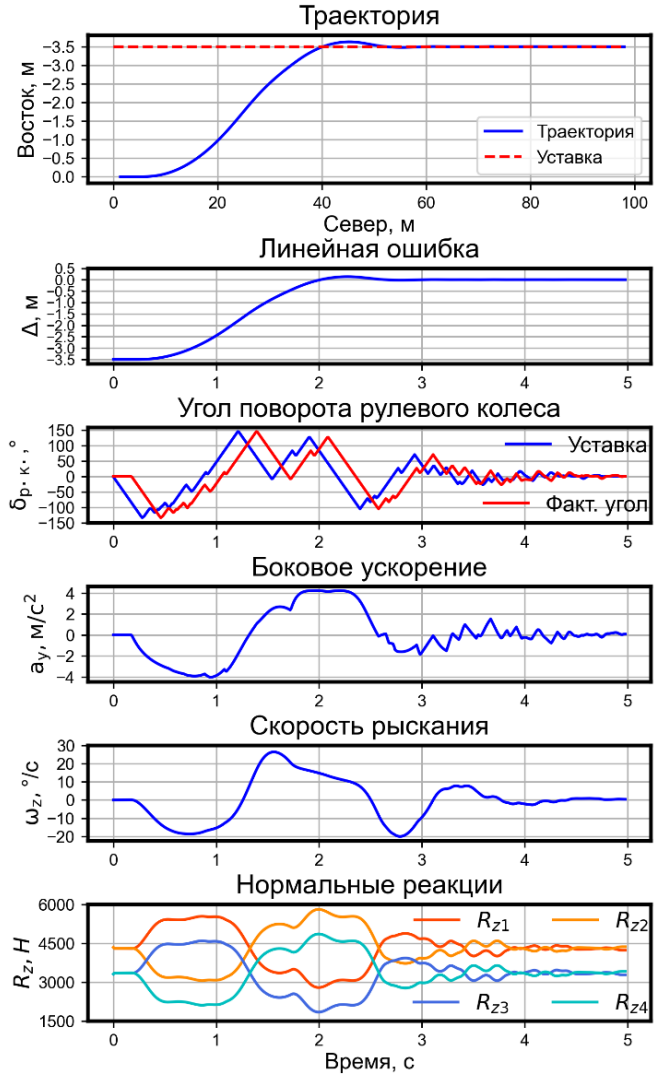


Рисунок 7 – Результаты расчета маневра уклонения от столкновения на укатанном снегу методом NMPC

Статическая ошибка $\Delta_{ст}$ отражает точность работы регулятора при стабилизации прямолинейного движения после выполнения маневра. К третьему типу относятся динамические критерии, характеризующие интенсивность и безопасность маневра ухода от столкновения посредством соответственно максимального бокового ускорения автомобиля и минимальных значений нормальных реакций на колесах автомобиля (фактор опрокидывания), реализованных при выполнении маневра.

В четвертой главе представлены результаты исследования разработанных алгоритмов управления посредством вычислительных экспериментов и дорожных испытаний автомобиля.

Исследование маневров уклонения с помощью метода NMPC было проведено в трех упомянутых выше условиях движения при различных скоростях автомобиля. В качестве примера на рисунке 7 представлены результаты расчета оптимального управления для маневра уклонения от столкновения на укатанном снегу с зимними шинами при скорости движения 70 км/ч. На графиках угла поворота рулевого колеса показан сигнал уставки, который является результатом решения задачи оптимизации, а также фактический угол поворота РК, используемый как входной сигнал математической модели с учетом задержки рулевого привода. Графики бокового ускорения отражают полноту использования бокового сцепления при выполнении маневров.

Результаты исследования управления с помощью метода NMPC показали, что его использование обеспечивает полную реализацию коэффициента бокового сцепления без потери устойчивости движения, а также высокое качество переходного процесса, что позволяет достигать лучших значений минимального безопасного расстояния.

Оценка зависимости минимального безопасного расстояния от скорости движения автомобиля, полученной в результате использования метода NMPC, проводилась в сравнении с результатами других исследований (работы Shiller, Hattori, Maeda, Adams, Eckert, Ackermann, Soudbakhsh), выполненных в схожих дорожных условиях, а также в сравнении с расчетной длиной тормозного пути, полученной при использовании экстренного торможения с реализацией максимального коэффициента сцепления в тех же условиях движения. Кроме того, в исследование были включены результаты расчета маневров уклонения, в которых характеристики автоматического привода рулевого управления были улучшены по сравнению с параметрами привода, используемого в исследуемом автомобиле. Оптимальное управление с улучшенными характеристиками рулевого управления названо в работе «NMPC_A». Его применение позволяет исследовать влияние параметров рулевого управления на минимальное безопасное расстояние и качество выполнения маневров. Основные результаты проведенного сравнительного исследования иллюстрируются рисунками 8 –10.

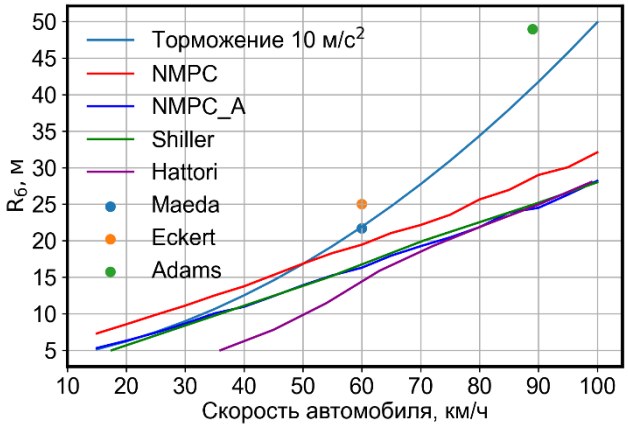


Рисунок 8 – Минимальное безопасное расстояние (сухой асфальт, летние шины)

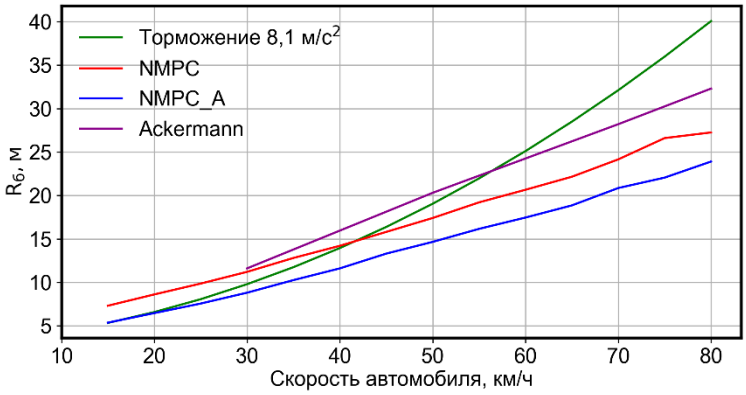


Рисунок 9 – Минимальное безопасное расстояние (сухой асфальт, зимние шины)

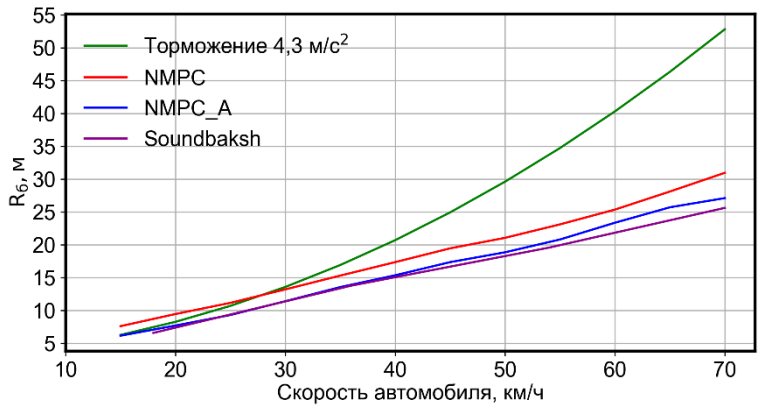


Рисунок 10 – Минимальное безопасное расстояние (укатанный снег, зимние шины)

Исследование, выполненное с помощью методов NMPC и NMPC_A, показало, что использование экстренного маневрирования вместо экстренного торможения позволяет уменьшать расстояние, на котором возможно предотвратить столкновение. На сухом асфальте с летними шинами при скорости более 50,2 км/ч снижение расстояния при использовании NMPC составило от 0,95 м (4,9%) до 18 м (36,2%); на сухом асфальте с зимними шинами при скорости более 41,5 км/ч снижение расстояния составило от 0,5 м (3,1%) до 12,82 м (32%); на укатанном снегу при скорости выше 27,7 км/ч снижение расстояния составило от 0,37 м (2,7%) до 21,7 м (41%). Эффект снижения расстояния увеличивается с ростом скорости автомобиля.

Сравнение полученных результатов с данными других перечисленных выше работ позволяет сделать вывод, что показатели, получаемые при использовании метода NMPC_A, близки к результатам исследований, в которых расчет маневров выполнялся с использованием оптимального управления. Также можно отметить, что управление с применением метода NMPC превосходит показатели водителей, поведение которых в экстренных ситуациях было изучено в исследованиях Maeda и Eckert.

В настоящей работе для обеспечения сравнимости характеристик различных траекторных регуляторов используются одинаковые параметры автомобиля и условия экспериментов, а в качестве эталонного управления, относительно которого выполняются оценки безопасности и качества маневров, используются результаты расчетов, выполненных с применением метода NMPC. Для сравнительной оценки метода NMPC и регуляторов, основанных на геометрическом методе, был проведен анализ результатов моделирования, включавший в себя оценку минимального безопасного расстояния, показателей качества выполнения маневров (быстродействие, перерегулирования Δ_{h1} и Δ_{h2}, статическая ошибка) и динамических параметров (максимальное боковое ускорение, минимальные нормальные реакции). В вычислительных экспериментах использовались настройки регуляторов, полученные с помощью оптимизации. В результате исследования было установлено, что регуляторы второго типа (с внутренним контуром регулирования по скорости рыскания) обеспечивают лучшие показатели безопасности и качества маневров, чем регуляторы первого типа. Также

было отмечено, что показатели регуляторов второго типа достаточно близки к показателям метода NMPC.

На основе анализа результатов исследования было сочтено целесообразным проведение дорожных испытаний автомобиля с использованием следующих геометрических регуляторов: курсовой с ПИ-регулятором, курсовой с ПИД-регулятором, курсовой регулятор с ω_z, четырехконтурный регулятор. Регулятор pure pursuit не был выбран для проведения испытаний в связи с его низкими результатами по критериям качества выполнения маневров. Траекторный регулятор не был включен в испытания, поскольку в результате сравнения характеристик был сделан вывод, что данный вид регулятора является аналогом курсового регулятора.

Изучение и настройка разработанных алгоритмов уклонения от столкновений проводились с помощью экспериментальных данных, полученных во время испытаний на автополигоне НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ». Объектом испытаний являлся переднеприводный легковой автомобиль с двигателем объемом 1,8 л, мощностью 90 кВт и механической 5-ступенчатой коробкой передач с автоматическим управлением.

Испытания автомобиля с использованием разработанных алгоритмов уклонения от столкновений проводились в сентябре 2021 г. на сухом асфальте (выполнено 64 испытательных заезда) и в феврале-марте 2022 г. на сухом асфальте (161 заезд) и укатанном снегу (143 заезда). Испытания заключались в автоматическом выполнении маневров объезда виртуального препятствия при помощи экстренного перестроения в соседнюю полосу движения. Ширина полосы принималась равной 3,5 м, что соответствует разметке испытательного участка в маневре типа «переставка». Скоростные режимы испытаний перечислены выше, в описании главы 2. На рисунке 11 представлены фрагменты испытаний.

Рисунок 11 – Фрагменты дорожных испытаний: маневр на асфальте (слева); маневр на укатанном снегу (справа)

На рисунке 12 представлено сравнение результатов одного из дорожных испытаний и моделирования с выполнением маневра на сухом асфальте с летними шинами с использованием курсового регулятора на основе ПИ-регулятора.

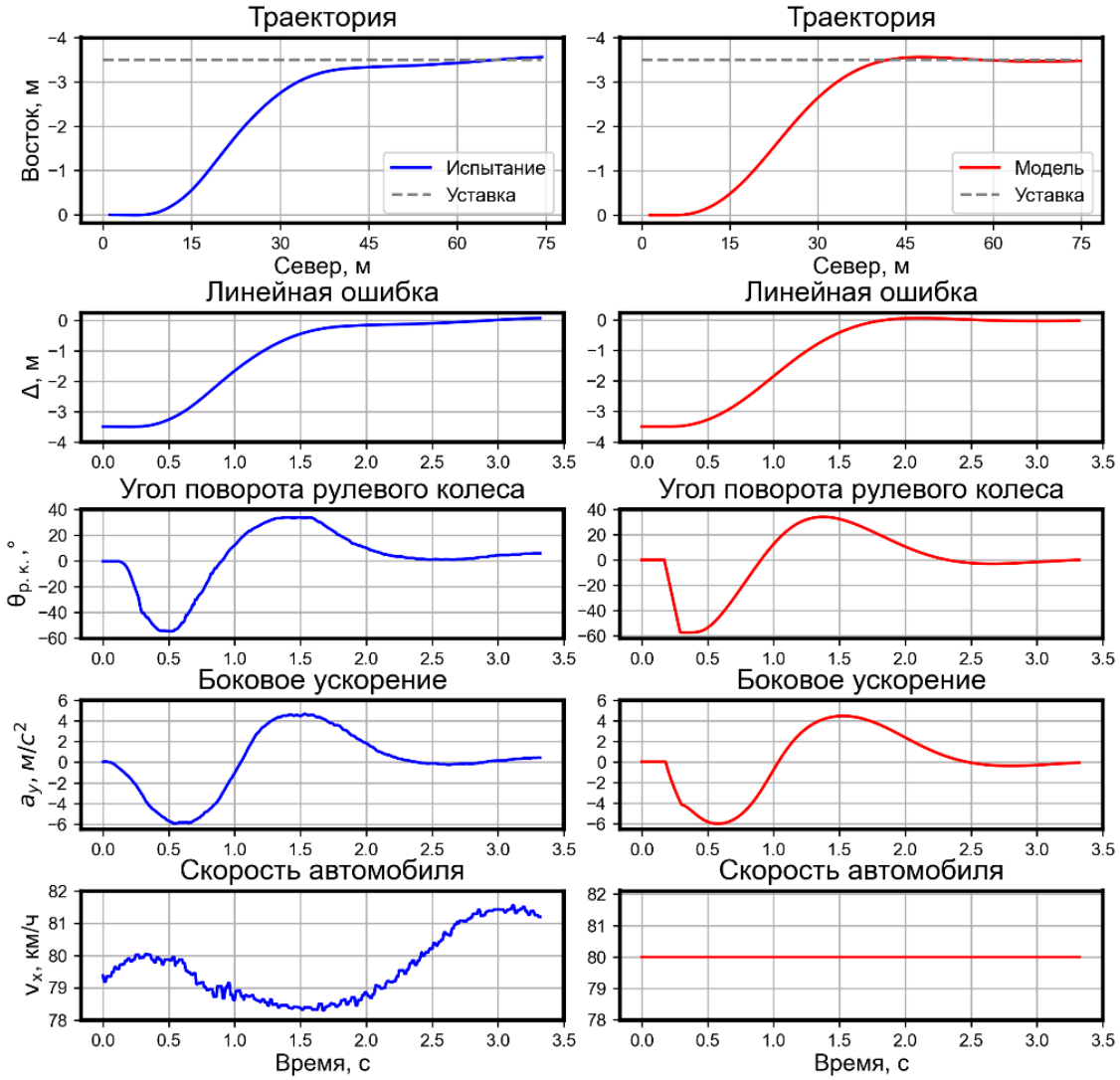


Рисунок 12 – Результаты дорожного испытания (слева) и математического моделирования (справа) при использовании курсового регулятора с ПИ-регулятором (сухой асфальт, летние шины)

По результатам испытаний определялось минимальное безопасное расстояние до препятствия (R_6), на котором необходимо начать выполнение маневра уклонения, чтобы предотвратить столкновение с учетом зон безопасности шириной 1 м вокруг препятствия. Геометрические размеры препятствия были приняты равными габаритным размерам испытываемого автомобиля.

На рисунках 13 и 14 в качестве примеров результатов исследования представлены показатели выполнения маневров с использованием четырехконтурного регулятора и курсового регулятора с ω_z: минимальное безопасное расстояние и максимальное боковое ускорение. Результаты моделирования представлены пунктирными линиями и в легенде имеют обозначение «(мод.)», результаты испытаний имеют обозначение «(исп.)».

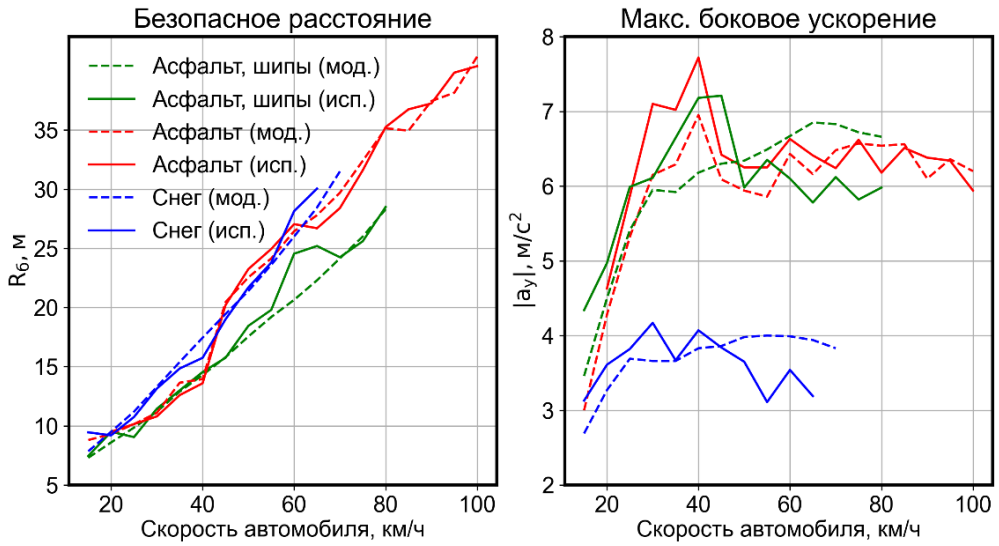


Рисунок 13 – Основные параметры маневров при использовании четырехконтурного регулятора: безопасное расстояние (слева), максимальное боковое ускорение (справа)

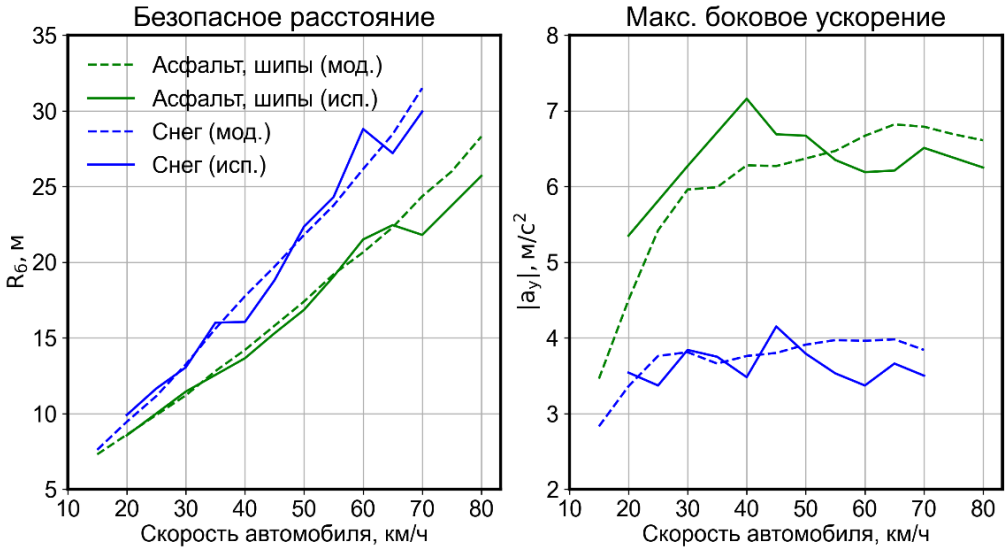


Рисунок 14 – Основные параметры маневров при использовании курсового регулятора с ω_z: безопасное расстояние (слева), максимальное боковое ускорение (справа)

По графикам, представленным на рисунках 12 – 14, можно сделать вывод о хорошей сходимости результатов испытаний и вычислительных экспериментов, включая сходимость критериев оценки маневров, выполненных с помощью рассмотренных геометрических регуляторов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ исследований в области систем активной безопасности автомобиля, целью которых является предотвращение столкновений при помощи автоматического маневрирования. В результате анализа выявлены недостатки существующих решений и исследований в предметной области: ограниченная эффективность систем предотвращения столкновений посредством экстренного торможения, недостаточный объем исследований по предотвращению столкновений на поверхностях с низким сцеплением, отсутствие общепринятых критериев для оценки качества маневров уклонения от столкновений.

2. Проведен сравнительный анализ математических моделей движения автомобиля на предмет применимости в исследованиях и разработках САБ, предназначенных для экстренного автоматического маневрирования. Для решения задач диссертационного исследования выбрана модель на основе четырехколесной расчетной схемы автомобиля с эластичными шинами, нелинейными характеристиками бокового сцепления и учетом перераспределения нормальных реакций посредством динамики бокового крена кузова. Предложен способ идентификации параметров модели с использованием экспериментальных данных и оптимизации на основе оригинального критерия качества. Адекватность выбранной модели подтверждается сопоставлением результатов вычислительных экспериментов с результатами дорожных испытаний автомобиля с определением абсолютных погрешностей и относительных среднеквадратических ошибок расчета бокового ускорения и скорости рыскания автомобиля. Получены следующие средние значения данных параметров в зависимости от опорной поверхности и используемых шин: на сухом асфальте с летними шинами $|\max \Delta a_y| = 1{,}04$ м/с^2, СКО a_y = 18,2%, $|\max \Delta\omega_z| = 0{,}04$ рад/с, СКО $\omega_z = 9\%$; на сухом асфальте с зимними шинами $|\max a_y| = 1{,}2$ м/с^2, СКО a_y = 18,3%, $|\max \Delta\omega_z| = 0{,}07$ рад/с, СКО $\omega_z = 11{,}6\%$; на укатанном снегу с зимними шинами $|\max \Delta a_y| = 0{,}96$ м/с^2, СКО a_y = 26,5%, $|\max \Delta\omega_z| = 0{,}08$ рад/с, СКО $\omega_z = 19{,}3\%$.

3. Предложен новый набор критериев для оценки безопасности и качества маневров уклонения от столкновений, включающий следующие параметры: максимальное боковое ускорение $|a_{y_max}|$, быстродействие $t_б$, перерегулирования Δ_{h1} и Δ_{h2}, статическую траекторную ошибку $\Delta_{ст}$ и минимальное значение нормальной реакции R_{z_min}. Критерии качества основаны на рассмотрении маневра как переходного процесса динамической системы.

4. Разработан алгоритм управления движением автомобиля для выполнения экстренных маневров на основе метода нелинейного модельно-прогностического управления (NMPC). Для алгоритма NMPC предложена оригинальная целевая функция, обеспечивающая расчет оптимальной программы управления автомобилем по критериям безопасности и качества маневра уклонения от столкновения. Предложены два новых геометрических регулятора: «четырехконтурный регулятор» и «курсовой регулятор с ω_z». Выполнена настройка параметров регуляторов с использованием методов оптимизации. Проведенные дорожные испытания подтвердили работоспособность регуляторов и

соответствие их характеристик безопасности и качества результатам теоретических исследований на опорных поверхностях как с высоким, так и с низким сцеплением шин.

5. Исследование, выполненное с помощью метода NMPC, показало, что использование экстренного маневрирования вместо экстренного торможения позволяет уменьшать расстояние, на котором возможно предотвратить столкновение. На сухом асфальте с летними шинами при скорости более 50,2 км/ч снижение расстояния составило от 0,95 м (4,9%) до 18 м (36,2%); на сухом асфальте с зимними шинами при скорости более 41,5 км/ч снижение расстояния составило от 0,5 м (3,1%) до 12,82 м (32%); на укатанном снегу при скорости выше 27,7 км/ч снижение расстояния составило от 0,37 м (2,7%) до 21,7 м (41%). Эффект снижения расстояния увеличивается с ростом скорости автомобиля.

6. Вычислительные и дорожные эксперименты показали, что предложенные новые регуляторы демонстрируют лучшие показатели безопасности и качества выполнения маневров, чем распространенный регулятор pure pursuit. Так, при использовании вместо pure pursuit четырехконтурного регулятора уменьшение минимального безопасного расстояния в маневрах на сухом асфальте с летними шинами составило до 8,6%; на сухом асфальте с зимними шинами – до 12,6%; на укатанном снегу с зимними шинами – до 6,7%. Снижение минимального безопасного расстояния по сравнению с результатами pure pursuit при использовании «курсового регулятора с ω_z» составило на сухом асфальте с летними шинами до 7,9%; на сухом асфальте с зимними шинами – до 12,6%; на укатанном снегу с зимними шинами – до 5,8%.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Kulikov I., Ulchenko I. Performance analysis of the sliding mode control for automated vehicle path tracking at low adhesion surfaces: the 7th International Conference on Traffic and Logistic Engineering (ICTLE 2019), MATEC Web.Conf / (2019). 6 с. **Издание входит в базу Web of Science**.
2. Kulikov I.A., Ulchenko I.A., Chaplygin A.V. Using Real World Data in Virtual Development and Testing of a Path Tracking Controller for an Autonomous Vehicle // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). Vol. 8. 2019. N 12. 7 p. **Издание входит в базу Scopus**.
3. Kulikov I.A., Ulchenko I.A., Chaplygin A.V. Development and Testing of a Collision Avoidance Braking System for an Autonomous Vehicle // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). Vol. 8. 2019. N 12. 7 p. **Издание входит в базу Scopus**.
4. Куликов И.А, Ульченко И.А., Чаплыгин А.В. Разработка и тестирование функций автоматического управления движением автомобиля // Сборник Технологии и компоненты наземных интеллектуальных транспортных систем. 2019. С. 441-444.
5. Ульченко И.А. Сравнительный анализ регуляторов траекторного движения автомобиля, основанных на геометрическом методе // Труды НАМИ. 2020. № 4 (283). С. 72–81. **Издание входит в перечень ВАК РФ**.