

УТВЕРЖДАЮ

Проректор ФГБОУ ВО «МАДИ»

по научной работе

д.т.н., профессор

Карелина Мария Юрьевна

01.07.2022



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МАДИ») на диссертационную работу Ульченко Ивана Алексеевича «Повышение безопасности колесных машин на основе совершенствования алгоритмов работы системы предотвращения столкновений», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины».

Актуальность темы диссертации

Снижение количества дорожно-транспортных происшествий является приоритетной задачей отечественных и международных программ, направленных на повышение безопасности дорожного движения. Одним из решений данной задачи является разработка новых и совершенствование существующих систем активной безопасности (САБ) автомобиля. 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 объектами дорожной обстановки. В течение прошедшего десятилетия наблюдался существенный рост исследований и разработок в области САБ нового поколения, а также их внедрение в серийных автомобилях. Наибольшее распространение получили САБ, предотвращающие столкновения посредством автоматического экстренного торможения. Вместе с тем очевидна востребованность систем, использующих автоматическое траекторное маневрирование для ухода от столкновений путем объезда препятствий. Данная область менее исследованная, а разработки в ней являются либо прототипами, либо серийными системами с весьма ограниченными условиями эксплуатации. Кроме того, можно отметить недостаток отечественных исследований, посвященных данной проблематике. В этой связи тема рассмотренной диссертационной работы представляет научный интерес и имеет высокую актуальность.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертационная работа Ульченко И.А. состоит из введения, 4 глав основного текста, раздела основных результатов и выводов, списка использованных литературных источников и 6 приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 136 страниц машинописного текста (без приложений), включая 88 рисунков и 5 таблиц (29 таблиц в приложениях). Список литературы содержит 120 наименования. Структура диссертационной работы соответствует перечню задач, поставленных для достижения сформулированной цели исследования.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, формулируются цель и задачи работы, представлены научная новизна, практическая значимость, информация о реализации и апробации результатов работы.

В первой главе представлен анализ известных решений и исследований в области систем активной безопасности автомобиля, целью которых является уклонение от столкновений. На основе сравнительного анализа характеристик водителя-человека и автоматической системы сделан вывод о перспективности применения автоматизации для помощи водителю в управлении автомобилем при возникновении опасности столкновений. Проведен анализ архитектуры САБ, предотвращающих столкновения, описаны ее основные функциональные блоки, из которых в качестве объекта исследования выделен блок, выполняющий автоматический маневр уклонения от столкновения. Функционирование данного блока основано на применении управляющих структур – регуляторов, различные типы которых рассмотрены в работе: геометрические регуляторы, оптимальные методы управления, основанные на моделях, релейные регуляторы, нечеткие регуляторы, регуляторы, основанные на искусственных нейронных сетях. В качестве основы для алгоритмов, осуществляющих маневры уклонения от столкновений, выбраны оптимальный нелинейный модельно-прогностический метод NMPC и регуляторы, основанные на геометрическом методе. Проведен анализ известных критериев оценки качества работы регуляторов, на основании которого сделан вывод о недостаточности существующих критериев и необходимости создания систематизированного подхода для количественной и качественной оценки выполнения маневров уклонения от столкновений. Также в главе представлено описание известных прототипов и серийных систем уклонения от столкновений, выделены их особенности и недостатки.

Во второй главе проведен сравнительный анализ шести различных математических моделей движения автомобиля с целью выбора наиболее подходящей для исследования и разработки алгоритмов экстренного маневрирования. Обоснован выбор модели 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. Представлен анализ модели автоматизированного рулевого управления и влияния его параметров на выполнение маневров уклонения от столкновений. Выполнена параметризация разработанных моделей и проведены вычислительные эксперименты. 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 предложенного критерия качества и данных испытательных заездов, воспроизводящих маневры экстренной смены полосы движения. Представлены количественные оценки точности рассматриваемых моделей на основе максимальных и среднеквадратических ошибок расчетных значений параметров движения от экспериментальных данных.

В третьей главе описаны разработанные алгоритмы, выполняющие маневры уклонения автомобиля от столкновений. В качестве средства для получения эталонного управления предложен алгоритм на основе метода NMPC, который производит расчет оптимальной программы управления углом поворота рулевого колеса с использованием математической модели автомобиля. Оптимальность управления обеспечивается минимизацией предложенного критерия качества, который включает в себя линейное отклонение автомобиля от опорной линии и штраф по условию предотвращения отрыва колес от дороги. Оптимизация производится при помощи градиентного метода. Для реализации в составе контроллера автомобиля рассмотрены известные регуляторы, основанные на геометрическом методе: регулятор типа pure pursuit, траекторный регулятор и различные варианты курсового регулятора. Кроме того, в работе предложены новые виды регуляторов, получившие названия «курсовый регулятор с ω_z » и «четырехконтурный регулятор». Также предложен новый набор критериев для оценки работы регуляторов при выполнении маневров уклонения от столкновений: минимальное безопасное расстояние, параметры качества маневра как переходного процесса динамической системы и динамические параметры маневра – достигнутое боковое ускорение и минимальная нормальная реакция.

В четвертой главе представлены результаты исследования разработанных алгоритмов управления посредством вычислительных экспериментов и дорожных испытаний автомобиля. Исследование, выполненное с помощью метода NMPC, показало, что использование экстренного маневрирования вместо экстренного торможения позволяет уменьшать расстояние, на котором возможно предотвратить столкновение, на 3...41% в зависимости от скорости движения автомобиля и типа опорной поверхности, причем с увеличением скорости преимущество маневрирования возрастает. Проведенное исследование показало, что геометрические

регуляторы, обладающие внутренним контуром регулирования, в сравнении с регуляторами, имеющими обратную связь только по координатам и курсовому углу автомобиля, демонстрируют лучшие результаты по показателям безопасности и качества выполнения маневров. Регуляторы, предложенные автором, показали результаты, близкие к результатам метода NMPC, что говорит о том, что их характеристики близки к оптимальным и их использование в практических целях позволит обеспечить высокие показатели безопасности и качества маневров. В рамках экспериментального исследования представлены результаты выполнения дорожных испытаний автомобиля в виде маневров уклонения от столкновения с «виртуальным препятствием» на поверхностях с высоким и низким сцеплением с использованием разработанных регуляторов. Полученные экспериментальные данные подтверждают работоспособность и эффективность регуляторов, в том числе оригинальных, и имеют хорошую сходимость с результатами вычислительных экспериментов.

В заключительном разделе обобщаются результаты диссертационного исследования, сформулированы общие выводы по поставленным задачам работы, представлены показатели адекватности использованной математической модели, а также численные показатели эффективности разработанных алгоритмов и степени их влияния на характеристики активной безопасности автомобиля. Выводы соответствуют структуре работы и являются научно-обоснованными.

Список литературы включает отечественные и зарубежные научные публикации в областях активной безопасности автомобиля, систем предотвращения столкновений, теории оптимального управления, автоматики, математического моделирования движения автомобиля.

Научная новизна диссертации

В диссертационном исследовании получены следующие новые научные результаты:

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, «курсовый 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.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов

При анализе диссертационной работы были отмечены следующие ее аспекты:

- аргументированное описание предлагаемых алгоритмов уклонения от столкновений;
- обоснованное и корректное использование математического инструментария – моделей движения автомобиля, оптимального метода управления NMPC, алгоритмов оптимизации, методов автоматического регулирования;
- представлено экспериментальное подтверждение результатов исследования, которое выполнено с использованием поверенного измерительного оборудования;
- полученные результаты согласуются с известными исследованиями, посвященными системам уклонения от столкновений.

Отмеченные аспекты позволяют считать, что результаты и выводы, представленные в диссертационной работе, являются корректными и научно-обоснованными.

Теоретическая и практическая ценность результатов работы, рекомендации по их использованию

Теоретическую ценность диссертационной работы составляют: предложенный метод расчета эталонного управления автомобилем на основе нелинейного модельно-прогностического управления, критерии оптимального подбора параметров математических моделей и регуляторов, критерий оптимального выполнения маневра уклонения от столкновения, критерии оценки качества выполнения маневров.

Практическую значимость представляют разработанные регуляторы траекторного движения автомобиля и их реализация в виде программного кода, который может быть адаптирован в составе электронных блоков управления САБ автомобилей.

Диссертационная работа и ее результаты могут быть рекомендованы в качестве методических материалов и источника практически полезной информации для исследователей, инженеров и аспирантов, работающих в областях динамики и активной безопасности автомобиля, занимающихся разработками систем активной безопасности.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационного исследования использовались при выполнении трех научно-исследовательских работ по тематикам активной безопасности и автоматизации управления движением автомобилей в рамках государственных контрактов ФГУП «НАМИ» с Министерством промышленности и торговли РФ (в 2020-2022 гг.) и Министерством

образования и науки РФ (в 2019 г). Также результаты диссертационной работы использовались при подготовке учебно-методического пособия для использования в образовательном процессе аспирантуры ФГУП «НАМИ», о чём свидетельствует полученный акт о внедрении.

Соответствие содержания диссертации научной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют формуле научной специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины» и относятся к двум областям исследований, указанным в паспорте специальности: п. 2 «математическое моделирование и исследование кинематики, статики и динамики, а также физико-химических процессов в транспортных средствах, их узлах и механизмах» и п. 4 «повышение качества, экономичности, долговечности и надежности, безопасности конструкции, экологических характеристик и других потребительских и эксплуатационных параметров транспортного средства».

Публикация результатов диссертации, соответствие автореферата ее содержанию

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 (перечень ВАК, Scopus, Web of Science).

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).

Структура и содержание автореферата в достаточной мере отражают содержание диссертации.

Замечания по диссертации и автореферату

1. В предлагаемом наборе критериев оценки критерии минимального расстояния до препятствия и времени выполнения маневра дублируют друг друга, критерии предельных боковых ускорений и минимальных вертикальных нагрузок на колеса следует считать ограничениями. Необходимо ввести еще одно ограничение – достижение предельных сил сцепления колес с дорогой для оценки вероятности, например, критического сноса передней оси в начальной стадии маневра уклонения.

2. Результаты испытаний, представленные в разделе 4.3, не дают возможности убедиться в том, что манёвры уклонения проведены с полным использованием сцепления шин с опорной поверхностью. Ни одного испытания, где объект испытаний (автомобиль) выходит за рамки установленных ограничений, то есть не вписывается в заданные траекторные ограничения или производит опасное сближение с виртуальным препятствием, не представлено.

3. Отрыв заднего внутреннего колеса при выполнении поворота (экстренном маневрировании), представленный на рис. 3.4 главы 3 для автомобилей рассматриваемого класса совершенно обычное явление. В связи с этим ограничение вертикальной реакции на колёсах 300 Н существенно снижает эффективность уклона и приводит к недоиспользованию сил сцепления.

4. При моделировании манёвра уклона отсутствует учёт работы системы электронного контроля устойчивости. Это может приводить к расхождению между результатом моделирования и реальным поведением объекта испытаний.

5. Моделирование маневров уклона и оценку разработанных алгоритмов на укатанном снеге в п. 4.1 следовало выполнять для зимних шин как с ошиповкой протектора, так и без нее.

Заключение

Рассмотренная диссертация является самостоятельной и завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научной задачи повышения активной безопасности автомобилей путем совершенствования алгоритмов предотвращения столкновений. Диссертационное исследование имеет научную ценность и практическую значимость для автомобильной промышленности. Полученные автором результаты достоверны, выводы обоснованы.

Автореферат диссертационной работы в достаточной мере отражает ее содержание и соответствует требованиям ВАК РФ. Выполненное исследование соответствует паспорту научной специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины» и критериям оценки диссертационных работ, изложенным в Постановлении Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. «О порядке присуждения ученых степеней». Автор диссертации «Повышение безопасности колесных машин на основе совершенствования алгоритмов работы системы предотвращения столкновений», Ульченко Иван Алексеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины».

Диссертация и отзыв рассмотрены и единогласно одобрены на заседании кафедры «Автомобили» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МАДИ») (протокол № 7 от 30.06. 2022 г.)

Гаевский Виталий Валентинович
Зам. Заведующего кафедрой «Автомобили»
ФГБОУ ВО «МАДИ»,
доктор технических наук, профессор
e-mail: vit-life@rambler.ru

Сведения о ведущей организации: Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «МАДИ»), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. Адрес: 125319, г. Москва, ул. Ленинградский проспект, д. 64; Тел.: +7(499)346-01-68, Факс: +7(499)346-01-68, e-mail: info@madi.ru, официальный сайт: <https://www.madi.ru/>.