ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ – ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»
ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

на правах рукописи

ПЕТИН Виктор Викторович

ПОВЫШЕНИЕ АКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЯ НА ОСНОВЕ СИНТЕЗА АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЭКСТРЕННОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Специальность 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Келлер Андрей Владимирович

Москва – 2022

Оглавление

Введение 5
1 Состояние вопроса, цель и задачи исследования 15
1.1 Обзор отечественных работ по безопасности движения ТС 18
1.2 Обзор зарубежных работ по безопасности движения ТС 23
1.3 Методы исследования САЭТ 28
1.4 Испытания с пешеходами 33
1.5 Обоснование для разработки системы автоматического экстренного торможения для отечественных автомобилей 37
1.6 Выводы по главе. Цель и задачи исследования 40
2 Разработка математической модели функционирования САЭТ 42
2.1 Общие аспекты разработки математической модели для создания и проверки алгоритма САЭТ 42
2.2 Математическая модель движения впереди идущего и испытуемого транспортных средств 44
2.3 Разработка математической модели имитации данных радарного сенсора 53
2.4 Разработка математической модели прогнозирования коэффициента сцепления колеса с дорожным покрытием в зависимости от внешних дорожно-климатических факторов 55
2.5 Описание примененного алгоритма прогнозирования коэффициента сцепления на базе применения аппарата нечеткой логики. 59
2.6 Синтез адаптивного алгоритма системы автоматического экстренного торможения 67
2.7 Блок-схема разработанного алгоритма функционирования САЭТ 71
2.8 Блок-схема разработанного алгоритма корректировки времени предупреждения об опасности столкновения 73
2.9 Выводы по главе 2 75
3 Методика и результаты экспериментального исследования 76

3.1 Цели и задачи экспериментального исследования 76
3.2 Объект исследования 77
3.3 Измерительное и записывающее оборудование 80
3.4 Методика проведения испытаний 83
3.5 Определение минимального количества повторных опытов 84
3.6 Испытания на проверку соответствия прогнозирования эффективности работы САЭТ в зависимости от установленной конфигурации систем активной безопасности 85
3.7 Испытания на проверку соответствия действительного коэффициента сцепления с дорожным полотном спрогнозированному значению..... 91
3.8 Экспериментальное исследование на сухом асфальте..... 92
3.9 Экспериментальное исследование на мокром асфальте 99
3.10 Экспериментальное исследование прогнозирования коэффициента сцепления на мокром базальте. (Имитация укатанного снежного покрытия) 106
3.11 Экспериментальное исследование на соответствие прогнозируемого времени достижения установившегося замедления действительному 113
3.12 Проведение испытаний на соответствие расчетного тормозного пути математической модели и тормозного пути, полученного экспериментально 120
3.13 Выводы по проведению экспериментального исследования в Главе 3 123
4 Технико-экономическая оценка эффективности синтезированного алгоритма работы системы автоматического экстренного торможения .. 125
4.1 Функциональные испытания САЭТ, включающей разработанный алгоритм 125
4.2 Функциональная оценка эффективности САЭТ на торможение перед стационарной мишенью 125
4.3 Проведение функциональных испытаний на эффективность работы разработанной САЭТ за динамической мишенью 133

4.4 Дорожные испытания разработанной САЭТ (испытания в сложных дорожно-климатических условиях) 140
4.5 Рекомендации по построению математической модели системы автоматического экстренного торможения 142
4.6 Конструктивные рекомендации по повышению эффективности функционирования систем автоматического экстренного торможения 144
4.7 Экономическая оценка предлагаемых решений 146
4.8 Выводы по Главе 4 149
Список литературы 154

Введение

В настоящее время в мире насчитывается более одного миллиарда автомобилей, при этом их число постоянно растет и по прогнозам аналитиков [1] к 2035 году количество автомобилей в мире может увеличиться в два раза. С ростом мирового автомобильного парка также растет и число дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Так, по данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) за год по причине ДТП погибает более 1 250 000 человек, и еще от 30 до 50 миллионов получают серьезные травмы. При этом общее количество ДТП за год во всем мире составляет более 11 000 000 [2]. Соответственно, каждая 11-я авария приводит к смертельному исходу. При этом статистика происшествий за последние несколько лет остается практически неизменной.

Автомобильные производители на протяжении многих десятилетий ведут разработку и внедрение различных автомобильных систем безопасности. До второй половины 20 века они были направлены, в основном, на повышение пассивной безопасности автомобиля, усовершенствование конструкции кузова, удерживающих устройств. Это показало высокую эффективность, и за пол века существования автомобиля его безопасность многократно возросла [3]. В настоящее время вектор развития направлен на внедрение систем активной безопасности автомобиля. Одними из наиболее значимых автомобильных систем активной безопасности справедливо считаются антиблокировочная система (ABS) и система стабилизации курсовой устойчивости (ESP). Система ABS (от немецкого Anti Blockier System) в серийном производстве впервые появилась в 1978 году на двух немецких моделях — Mersedes Benz W116 (S-класс) и BMW 7-й серии. Значимость этого изобретения трудно переоценить. Благодаря антиблокировочной системе колодка прижимается к барабану или диску многократно (до 20 раз в секунду), позволяя избежать блокировки колёс, что существенно улучшает управляемость автомобиля при торможении [4]. Позднее, в 1995 году

распространение получила ESP (Electronic Stability Program) или в переводе система стабилизации курсовой устойчивости (СКУ), которая предотвращает занос автомобиля. Многие эксперты называют систему стабилизации курсовой устойчивости самым важным изобретением в сфере автомобильной безопасности после ремней безопасности. Она обеспечивает водителю лучший контроль над поведением автомобиля, следя за тем, чтобы он перемещался в том направлении, куда указывает поворот руля [5]. По данным страхового института дорожной безопасности (IIHS) и национального управления безопасностью движения на трассах NHTSA (США), примерно одна треть смертельных аварий могла бы быть предотвращена системой стабилизации курсовой устойчивости автомобиля, если бы ей были оснащены все выпускаемые колесные транспортные средства [6].

На сегодняшний день в мире одним из перспективных путей повышения безопасности дорожного движения является развитие и распространение интеллектуальных систем активной безопасности автомобиля. Для решения задачи повышения безопасности мировые лидеры автопрома активно занимаются разработкой и внедрением интеллектуальных систем помощи при вождении, которые обеспечивают контроль за движением автомобиля и могут частично вмешиваться в управление транспортным средством [7]. Системы помощи водителю, связанные с автоматическим воздействием на тормозную систему автомобиля, напрямую зависят от работы ABS и ESP, и без их внедрения не были бы возможны. Благодаря широкому распространению систем ABS и ESP, в 1999 году появилась продвинутая версия круиз-контроля — адаптивный круиз-контроль (adaptive cruise control), а в 2008 году инженеры Volvo презентовали систему автоматической остановки автомобиля при опасности фронтального столкновения, способную погасить скорость на 30 км/ч, что являлось одной из первых интеграций систем интеллектуальной помощи водителю в состав серийного автомобиля [8]. Следует отметить, что системы интеллектуальной помощи при вождении уже довольно широко распространены на серийных автомобилях. Система адаптивного

круиз- контроля, являющаяся усовершенствованной версией системы стандартного круиз-контроля, устанавливается уже на многие автомобили не только премиального класса, но и автомобили среднего ценового сегмента. С более глубоким освоением радарного зрения и систем распознавания объектов по видеокамерам появились и новые системы интеллектуальной помощи водителям. Одной из таких систем является автоматическое экстренное торможение автомобиля, получившая широкое распространение и внедрение за последние несколько лет.

Одним из толчков для распространения системы автоматического экстренного торможения послужило ее тестирование в Европейском комитете по проведению независимых краш-тестов автомобилей с оценкой активной и пассивной безопасности EuroNCAP. Начиная с 2014 года, для получения наивысшего рейтинга в пять звезд, тестируемому автомобилю необходимо иметь в своем составе данную систему [9]. Такие требования основаны на исследованиях комитета, согласно которым использование системы автоматического экстренного торможения позволит снизить количество дорожно-транспортных происшествий более чем на 35 %.

Результаты исследований EuroNCAP и National Highway Traffic Safety Administration показывают, что именно внедрение системы автоматического экстренного торможения (САЭТ) на данный момент является наиболее эффективным решением проблемы повышения безопасности автомобилей.

Европейской комиссией уже заложена обязательность внедрения и предполагается продолжать активно распространять системы автоматического экстренного торможения на автомобили уже в ближайшие несколько лет [10]. Помимо независимого рейтинга системы оценок Euro NCAP существуют и требования к сертификации транспортных средств – правила ЕЭК ООН 131 - Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения механических транспортных средств в отношении опережающих систем экстренного торможения (ОСЭТ) от 09 июля 2013[11] и ЕЭК ООН 152 - Единообразные предписания, касающиеся официального

утверждения автотранспортных средств в отношении систем автоматического экстренного торможения (САЭТ) для транспортных средств категорий M(1) и N(1) от 22 января 2020 [12].

В законодательстве по сертификации автомобилей Евросоюза уже принято, что наличие системы автоматического экстренного торможения является обязательным для новых грузовых автомобилей и автобусов начиная с 1 ноября 2015 года [13]. Следующим шагом по распространению системы было запланировано введение в законодательство обязательного наличия системы и для легковых автомобилей всех типов, не позднее первого квартала 2018 года [14]. Автопроизводители США при поддержке Страхового института дорожной безопасности и Национального управления по безопасности дорожного движения приняли соглашение о том, что легковые автомобили и лёгкие грузовики (пикапы) должны будут иметь в составе систему автоматического экстренного торможения начиная с 1 сентября 2022 года, а все грузовые транспортные средства должны получить систему автоматического экстренного торможения не позднее 1 сентября 2024 года [15].

Для сертификации существует несколько методик проведения испытаний и оценки системы автоматической экстренной остановки автомобиля, но все они предусматривают проведение испытаний в условиях, наиболее благоприятных для эффективной работы системы. Как предписывают требования к проведению испытаний ЕЭК ООН – это отсутствие осадков, ровное асфальтированное сухое покрытие, положительная температура воздуха. При рассмотрении работы системы автоматического экстренного торможения, опираясь на испытания, проводимые в подобных внешних условиях, трудно оценить эффективность работы системы в повседневных условиях эксплуатации, особенно в сложных дорожно-климатических условиях, характерных для большинства регионов Российской Федерации [16].

Помимо сложных дорожно-климатических условий в РФ причинами дорожно-транспортных происшествий фигурирует нарушение правил дорожного движения водителями (более 50 % от всего количества на территории РФ за 2019 - 2020 года), остальные приходятся на нарушение правил со стороны пешеходов и других участников движения, а также прочие причины, не связанные с нарушением ПДД (проблемы со здоровьем водителя во время движения, неисправное техническое состояние ТС и т.д.). Системы активной безопасности и интеллектуальных систем помощи при вождении должны оказаться сдерживающим фактором по большинству сценариев возникновения ДТП, заранее предупреждая водителя о потенциальной опасности и вмешиваясь в управление автомобилем, в частности активируя торможение в минимально короткие временные интервалы, предотвращая столкновения или снижая тяжесть их последствий. Помимо сохранения жизни и здоровья людей немаловажным положительным фактором от внедрения данной системы является и экономическая выгода, как для страховых компаний, так и для государства. Учитывая, что ежегодно в РФ погибает около 18 тысяч человек, а экономический урон составляет около 300 млрд рублей, можно сделать вывод о явном положительном эффекте оснащения автомобилей данной системы с точки зрения экономической выгоды [17].

Ведущие производители автомобилей с многолетней историей, как BMW, Volvo, Mercedes-Benz, Volkswagen, укомплектовывают системой автоматического экстренного торможения большую часть производимых моделей. Euro NCAP в отчете отметило такого производителя как Volvo, за то, что 58 % моделей автомобилей в базовой комплектации имеют AEB. Следующими отмечены Infiniti и Mercedes-Benz, которые оснащают системой экстренного торможения 42 % и 29 % своих моделей соответственно [18-20]. И напротив, при рассмотрении широкого списка мировых производителей автомобилей мы видим иную картину, что более половины производителей автомобилей либо не предлагают данную систему безопасности ни для одного

из производимых автомобилей модельного ряда, либо не поставляют их в качестве опции на рынки определенных стран.

Несмотря на большой научно-технический задел, внесенный учеными и инженерами научных школ ФГУП «НАМИ», МАДИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ВолГТУ, СибАДИ и др., вопросы повышения эффективности работы САЭТ в характерных для Российской Федерации сложных дорожно-климатических условиях изучены не до конца и в некоторых областях исследований до сих пор находятся пробелы. Не в полной мере разработаны математические модели функционирования САЭТ при движении автомобилей в потоке с учетом различных сценариев поведения водителей на дороге, не проведены исследования особенностей функционирования с учетом конфигурации сенсорной аппаратуры и систем активной безопасности. Несмотря на постепенное внедрение и распространение САЭТ заметного повышения безопасности на дорогах не происходит, а также остаются вопросы по эффективности работы данной системы, тем более в сложных дорожно-климатических условиях РФ.

На сегодняшний день автомобильные производители не заявляют о серийной системе автоматического экстренного торможения, эффективную работу которой они гарантировали бы в сложных дорожно-климатических условиях. Более того, на текущий момент нет ни одной серийно устанавливаемой системы автоматического экстренного торможения (САЭТ) отечественной разработки.

Цель исследования - повышение активной безопасности автомобилей в сложных дорожно-климатических условиях путем синтеза адаптивного алгоритма функционирования системы автоматического экстренного торможения и разработки средств его реализации.

Объект исследования - система автоматического экстренного торможения транспортных средств категории М(1).

Предмет исследования - процесс функционирования системы автоматического экстренного торможения.

Задачи исследования:

– Разработать уточненную математическую модель функционирования системы автоматического экстренного торможения, учитывающую сценарии поведения автомобиля-лидера, работу сенсорной аппаратуры автомобиля, наличие дополнительных систем активной безопасности в конфигурации тормозной системы.

– Дополнить методику прогнозирования коэффициента сцепления колес автомобиля с опорной поверхностью в сложных дорожно-климатических условиях.

– Синтезировать адаптивный алгоритм функционирования системы аварийного экстренного торможения и разработать средства его реализации.

– Провести экспериментальное исследование с оценкой достоверности прогнозирования коэффициента сцепления, времени срабатывания тормозного привода и тормозного пути в сложных дорожно-климатических условиях.

– Провести технико-экономическую оценку результатов исследования и разработать рекомендации по повышению эффективности функционирования систем автоматического экстренного торможения.

Методика исследования включает в себя математическое моделирование движения колонны транспортных средств из автомобиля-лидера и исследуемого автомобиля; теоретический анализ процессов и влияния различных факторов на эффективность торможения; синтез закономерностей в процессе функционирования САЭТ, экспериментальные исследования движения. Выполненные исследования базировались на основных положениях прикладной теории движения автомобиля; теоретической механики; теории автоматического управлении; нечетких множеств; методах инженерного эксперимента; теории вероятности; математического анализа и планирования эксперимента.

Экспериментальные исследования проводились на территории Центра Испытаний НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ» и дорогах общего пользования. Расчетно-экспериментальное моделирование проводилось с помощью программных комплексов MATLAB 2015b, Simulink, Fuzzy Logic Toolbox, Visual Studio, Code Composer v.9.5, Canalyzer v9.0.

Научная новизна работы:

1. Уточнена математическая модель функционирования системы автоматического экстренного торможения, позволяющая на стадии проектирования синтезировать рациональную конфигурацию системы автоматического экстренного торможения и алгоритм ее функционирования, отличающаяся использованием модели поведения автомобиля-лидера, моделированием функционирования сенсорно-аппаратной части транспортного средства, адаптацией алгоритма в зависимости от конфигурации систем активной безопасности автомобиля. На основе модели предложена уточненная зависимость для определения остановочного пути автомобиля.

2. Дополнена методика прогнозирования коэффициента сцепления колес автомобиля с опорной поверхностью в сложных дорожно-климатических условиях, отличающаяся учетом дополнительных параметров и характеристик, позволяющая с высокой точностью оценить остановочный путь колесного транспортного средства в процессе автоматического экстренного торможения.

Практическая значимость полученных результатов

Разработаны методики, позволяющие на стадии проектирования автомобиля синтезировать адаптивные алгоритмы функционирования системы автоматического экстренного торможения.

Разработаны технические предложения и даны практические рекомендации по повышению эффективности работы систем автоматического экстренного торможения, обеспечивающие более полную реализацию потенциальных тормозных свойств автомобиля.

Приведенные в диссертации материалы могут найти применение в научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях, занимающихся разработкой перспективных и модернизацией существующих систем автоматического экстренного торможения автомобиля.

На защиту диссертации вынесены:

– уточненная математическая модель функционирования системы автоматического экстренного торможения;

– методика прогнозирования коэффициента сцепления колес автомобиля с опорной поверхностью в сложных дорожно-климатических условиях;

– технические решения и практические рекомендации по повышению эффективности работы систем автоматического экстренного торможения;

– результаты экспериментальной оценки эффективности предлагаемых решений.

Реализация результатов работы.

Основные результаты работы реализованы:

– во ФГУП «НАМИ» при разработке системы автоматического экстренного торможения для автомобилей проекта «Единая модульная платформа»;

– в разработке интеллектуальных систем помощи водителю в ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ».

– в учебном процессе Московского политехнического университета.

Апробация работы.

Основные положения диссертации были доложены и обсуждены на следующих форумах и конференциях:

– Международной научно-технической конференции «Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации» (23-26 апреля 2019г.).

– Международном автомобильном научном форуме МАНФ-2019 «Технологии и компоненты наземных интеллектуальных транспортных систем».

– Международном автомобильном научном форуме МАНФ-2020 «Наземные интеллектуальные транспортные средства и системы» и АВТОНЕТ - 2020 «Форум инновационных транспортных технологий».

– Международном автомобильном научном форуме МАНФ-2021 «Наземные инновационные транспортные средства с низким углеродным следом».

Публикации. Основные положения опубликованы в 5 работах (в том числе 2 работы входят в список ведущих рецензируемых научных журналов и изданий).

1 Состояние вопроса, цель и задачи исследования

Автомобиль и автомобильная дорога всегда являлись объектами повышенной опасности. Естественно, что автомобильные производители и инженеры всегда занимались вопросом повышения безопасности. Чтобы помочь водителю предотвратить различные дорожно-транспортные происшествия появлялись различные системы безопасности. На сегодняшний день одной из перспективных систем помощи водителю, способной повысить безопасность транспортных средств и сократить количество ДТП является система автоматического экстренного торможения (САЭТ).

Как правило, в повседневной эксплуатации автомобиля не возникает препятствий для движения транспортных средств, но возможное внезапное изменение дорожной обстановки требует от водителя экстренных действий. В ряде случаев водитель не испытывает стрессовых ощущений, связанных с появлением препятствия. Как правило, он реагирует на объекты, которые уже некоторое время находятся в его поле зрения. Например, двигаясь в транспортном потоке, он контролирует дистанцию до впереди идущего автомобиля, или в условиях ограниченного обзора он выбирает безопасную скорость и дистанцию. Соответственно, некоторое время водитель наблюдает за изменяющимся сценарием дорожной обстановки для принятия решения о применении определенных маневров движения автомобиля [21].

В настоящее время при эксплуатации автомобиля существует множество факторов, отвлекающих водителя от управления транспортным средством: управление параметрами климат контроля, управление мультимедийным устройством, отвлечение на навигационное устройство и т.д. Но не только отвлечение водителя от окружающей обстановки может спровоцировать несвоевременное начало снижения скорости. Данные, опубликованные А.П. Васильевым в книге «Эксплуатация автомобильных дорог» показывают, что динамическое снижение сцепных свойств покрытия в следствие осадков или иных внешних факторов приводит к прогрессирующему росту среднего

числа ДТП. При этом в значительной мере возрастает доля ДТП, совершенных при использовании водителем экстренного торможения [22].

Наибольшее количество ДТП совершаются по сценарию прямого столкновения с впереди идущим автомобилем. Причинами этому являются:

– отвлечение внимания от управления автомобилем;

– приложение водителем недостаточного тормозного усилия;

– реальный тормозной путь оказался длиннее прогнозируемого водителем.

Серьезно усложняют управление автомобилем изменяющиеся климатические воздействия осадков в виде дождя и снега, что неодинаково сказывается на состоянии поверхности при наличии участков с различным поперечным уклоном, глубиной колеи, нарушением прямолинейности поверхности и т.д. Также по мере роста скорости движения автомобиля наблюдается существенное снижение сцепных свойств шины с опорной поверхностью, вплоть до возникновения явления аквапланирования. Анализ данных свидетельствует, что на высоких скоростях различие в реализованных силах сцепления может достигать 80 %. При снижении скорости до эксплуатационных значений реализуемая неравномерность сцепных свойств колес уменьшается до 15-25 %. Неравномерное высыхание дорог после действия осадков также способствует возникновению "микста" и неравномерность сцепления достигает 23-30 % [23].

Характерно, что при отсутствии осадков за счет подтаивания снега и в период последействия осадков возникающая неравномерность реализации сцепных свойств по бортам может достигать 30-35 %. Образованию участков с неравномерным распределением водно-грязевой суспензии особенно способствуют нарушения геометрии и целостности покрытия.

Воздействие автотранспортных средств на сухую поверхность дороги при движении, обусловливающее изменение сцепных свойств в поперечном направлении, наблюдается в образовании полос наката, масляных пятен,

внесении частиц перевозимого груза, резины, воды и т.д., при этом происходит изменение первоначальных сцепных свойств поверхности дороги.

Другой причиной образования поперечной неравномерности сцепных свойств поверхности является неквалифицированный ремонт дороги, когда производится частичное восстановление асфальтобетона, попадающего при движении автомобиля под колеса правого или левого бортов. При этом движение колонны автомобилей осуществляется на участках с различной микроструктурой покрытия. Анализ данных, с точки зрения возможности образования поперечной неравномерности коэффициента сцепления, показывает, что даже на сухой дороге разность сцепных свойств на подобном участке может достигать 11-15 %, а на мокрой поверхности различие возрастает до 18-20 %. Такой широкий разброс является еще одной причиной увеличения количества ДТП во время возникновения осадков, вследствие изменения тормозного пути и слабой адаптации водителей к изменяющимся условиям [24]. При этом, все вышеперечисленные сценарии – это далеко не весь список возможных причин столкновений.

Еще одним из направлений повышения безопасности дорожного движения на колесных транспортных средствах является развитие и распространение систем интеллектуального автоматизированного управления, созданных на базе устройств, способных анализировать дистанцию и координатное положения транспортных средств в потоке движения. По своему принципу функционирования подобные системы можно назвать автоматами управления, которые функционируют, базируясь на информации от систем технического зрения. В качестве сенсоров наиболее часто используются оптические, ультразвуковые или радиолокаторы. Информация, приходящая от сенсоров о дистанции между автомобилями в потоке или между автомобилем и препятствием, обрабатывается вычислительным блоком и используется для принятия решения об управляющем воздействии на режим движения или применении автоматического торможения для предотвращения ДТП. По подсчетам

различных аналитиков и специалистов, с помощью систем интеллектуальной помощи при вождении, снижение количества ДТП с наездами на пешеходов и столкновениями возможно снизить до 60-70 %.

Развитие систем активной безопасности сделало большой шаг вперед с развитием и внедрением электронных устройств и систем. На сегодняшний день практически все современные автомобили оборудованы системой ABS, а в большинстве случаев и системой ESP. Судя по предпосылкам, следующим высоко значимым шагом в повышении безопасности движения автомобилей на дорогах общего пользования станет активное внедрение систем автоматического экстренного торможения [25].

1.1 **Обзор отечественных работ по безопасности движения ТС**

Вопросы повышения безопасности движения за счет улучшения тормозных свойств транспортных средств всегда находились в центре внимания ученых. Выполнено большое количество работ по разработке новых систем безопасности автомобилей, относящихся к тормозным системам, в том числе применимых на серийных автомобилях [26-29].

В 1975 году А.А. Юрчевский сформировал концепцию системы автоматического экстренного торможения. Концепция носила название «Система предотвращения столкновений автомобилей» и подразумевала использование СВЧ-локаторов в качестве сенсоров технического зрения. [30]

Алгоритм работы, предложенный А.А. Юрчевским состоит из следующих этапов работы:

– обнаружение объекта-помехи;
– измерение дистанции до объекта;
– измерение скорости данного объекта;
– расчет безопасной дистанции в зависимости от собственной скорости;
– сравнение безопасной дистанции и текущей;

– расчет момента, когда необходимо активировать систему предупреждения столкновения;

– передача сигнала водителю об опасности столкновения.

Вместе с тем, на момент появления концепции САЭТ технический уровень электронных компонентов не позволял создать действующую систему, способную функционировать в составе автомобиля на дорогах общего пользования. Кроме того, интеграция данной системы в автомобиль требовала предустановленных на транспортное средство систем активной безопасности (ABS и ESP), поскольку резкая остановка колесного ТС может спровоцировать снос, потерю управления и опрокидывание.

Одним из первых работать в области антиблокировочных систем стал А.А. Ревин.

В процессе исследования А.А. Ревин вывел дорожные факторы, обуславливающие возникновение постоянно действующих возмущений:

– неравномерность коэффициента сцепления по ширине дороги:

1) различие в микроструктуре покрытия;

2) причина: явление «старения» покрытий, восстановление отдельных участков при ремонтных работах;

3) образование полос наката;

4) причина: воздействие автотранспорта;

5) внесение частиц земли и перевозимого груза;

6) причина: воздействие автотранспорта, неквалифицированная расчистка и полив дорог;

7) различие в консистенции водно-грязевой суспензии;

8) причина: неквалифицированная расчистка и полив дорог, погодно-климатическое воздействие;

9) различие в толщине водяного слоя;

10) причина: неквалифицированная расчистка и полив дорог;

– профиль дороги:

1) макро и микропрофиль дороги, поперечный уклон дороги, криволинейность участков дорог;

причина: отклонение от норм СНиП (строительные нормы и правила) при производстве и ремонте дорог [31].

Отталкиваясь от данных, полученных в этой работе, следует, что на одном участке дороги коэффициент сцепления может изменяться в довольно большом диапазоне. Например, для сухого асфальта данный коэффициент примерно равен от 0,8 до 0,9. Для мокрого асфальта коэффициент равен от 0,5 до 0,6. При этом ухудшается не только управляемость автомобиля при торможении, но и резко увеличивается тормозной путь автомобиля [32]. Также, в приведенном выше анализе, взятом из исследований А.А. Ревина, коэффициент сцепления с дорогой может изменяться ± 0,3 даже в поперечном рассмотрении одной полосы движения. На рисунке 1.1 показана зависимость сцепных свойств от водного слоя на дороге и скорости.

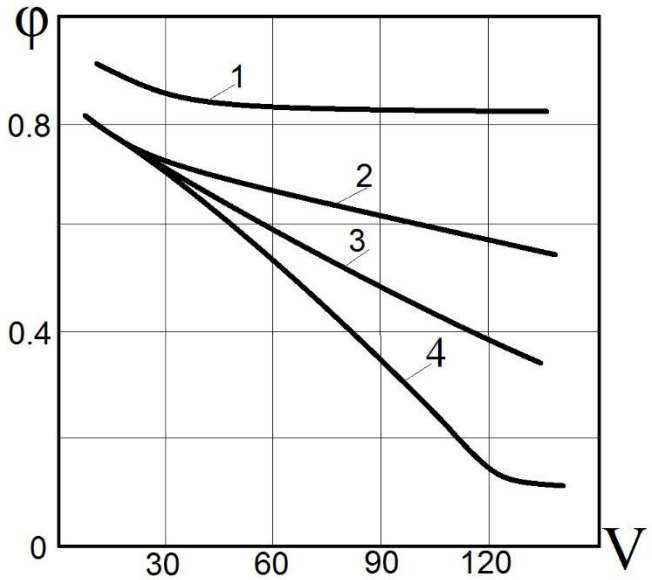


Рисунок 1.1 – График зависимости сцепных свойств пары «шина-дорога» от линейной скорости при различной толщине поверхностного слоя воды

ϕ – коэффициент сцепления шин с дорогой;

V – скорость движения автомобиля (км/ч).

1 - сухой асфальт, 2 - 0,2 мм водяного слоя, 3 - 1,0 мм водяного слоя, 4 - 2,0 мм водяного слоя.

Несмотря на то, что системы ABS и ESP уже давно вошли в состав автомобиля и повсеместно используются, работы над их совершенствованием и доработкой не останавливаются и на сегодняшний день.

Так Ахметшин А.М. в своей работе [33] рассматривал задачу повышения активной безопасности движения колесных машин на основе применения унифицированной ABS.

Одним из основных итогов данной работы является полученный адаптивный алгоритм, который должен решать задачу управления антиблокировочной системой колес, которая компенсирует недостаток текущей информации об объекте управления «колесо – дорога». Для решения было принято использовать запоминание предыдущей информации изменения состояния объекта, значения давления в тормозном приводе, распознавание текущего динамического образа объекта и прогнозирование дальнейшего развития состояния объекта.

Гурьянов М.В. в работе [34] исследовал математическое моделирование автомобиля, как системы с неограниченным числом степеней свободы. Также были учтены характеристики рассеяния энергии в элементах конструкции, в процессе нелинейного взаимодействия шин автомобиля с дорожным полотном. Система курсовой устойчивости была рассмотрена, как многомерная система, исследуемая частотными методами, что позволяет осуществлять априорную оценку критической скорости автомобиля и параметров, которые влияют на устойчивость, с меньшими материальными и временными затратами.

Рязанцев В.А. проделал работу [35,36] по разработке метода построения тормозного управления, которое способно учитывать взаимное влияние колес каждой оси через перераспределение вертикальных реакций и взаимодействие колеса с опорной поверхностью при индивидуальном антиблокировочном управлении колесами.

Бахмутов С.В., Бузников С.Е., Сайкин А.М., Ендачев Д.В. [37] исследовали методы системного анализа и современной теории управления. Рассмотрели структурированное множество столкновений с помощью метода «Морфологического ящика» Цвикки. В работе приведены результаты, позволяющие решить задачи мониторинга вектора координат состояния и его динамических границ на основе виртуальных датчиков информации, позволяющих получить решение этой задачи в минимально возможной конфигурации технических средств. На основе проведенного анализа свойств структурированного множества столкновений предложили последовательность этапов опытной эксплуатации беспилотных транспортных средств возрастающей сложности и сформировали задачи, которые необходимо решать на каждом из них.

Иванов В.Г., Бутылин Г.В., Сяхович В.Э., Широков Б.Н. работе [38] об оценке сцепления колеса с дорогой на базе Белорусского национального технического университета в 2005 году предложили использование нечеткой логики для определения текущего значения коэффициента сцепления шин с опорной поверхностью. В качестве входных параметров для нечеткой логики они использовали данные о температуре окружающей среды и относительной влажности воздуха. Данный алгоритм был предложен для улучшения работы антиблокировочной системы автомобиля.

Иванов А.М., Кристальный С.Р., Попов Н.В. описали принцип действия и различные варианты конструкций систем автоматического экстренного торможения современных автомобилей [39]. В работе предложены методики оценки эффективности работы САЭТ в российских условиях эксплуатации. Также был описан необходимый комплекс измерительной и регистрирующей аппаратуры для выполнения исследований и представлены результаты проведения испытаний САЭТ с различными вариантами конфигураций технического зрения.

Топорков М. А. предложил усовершенствованный алгоритм функционирования САЭТ [40], включающий в себя механизм

прогнозирования сцепных свойств поверхности дороги на базе нечеткой логики. В качестве входных данных использовалась информация о температуре окружающего воздуха и интенсивности осадков.

Результаты экспериментальной оценки показали, что использование данного метода прогнозирования позволяет улучшить работу САЭТ относительно существующих аналогов. Таким образом, основываясь на результатах данной работы становится очевидно, что использование информации от сенсорно-аппаратной части, которыми оборудовано большинство современных автомобилей, позволяет создавать методики прогнозирования текущего состояния дорожного полотна и коэффициента сцепления.

1.2 **Обзор зарубежных работ по безопасности движения ТС**

Анализ публикационного ландшафта в сфере систем автоматического экстренного торможения показывает высокую заинтересованность вопросом повышения эффективности работы данной системы мировым автомобильным сообществом.

Так, Raymond J. Kiefer, Alice Haskins и Jonathan M. Hankey в своей работе [41] описали проведение тестов реакции водителей разного пола и возраста на внезапное возникновение опасности прямого столкновения.

Для теста был взят штатный автомобиль и сделан специальный стенд, устанавливаемый перед автомобилем, который имитирует возникновение препятствия в виде ребенка, взрослого человека или автомобиля на пути движения автомобиля. Эти препятствия возникали внезапно в то время, когда водитель имитировал отвлечение от дорожной ситуации с помощью специально разработанного алгоритма отвлечения внимания, в виде тестовых графических заданий, которые размещались на центральной консоли панели приборов. Специально установленные камеры и сенсоры фиксировали скорость реакции и силу воздействия на педаль тормоза. В первом случае препятствие возникало внезапно, а во втором с имитацией системы

предупреждения о столкновении. Визуально-звуковое предупреждение об опасности столкновения активировалось за 300мс до возникновения препятствия. В результате, в 90 % случаев время реакции и воздействие на педаль тормоза были гораздо эффективнее в случае с предупреждением о столкновении.

Andres Aparicio, Micha Lesemann, Henrik Eriksson в своей работе [42] рассмотрели и протестировали эффективность существующих методов испытаний для оценки работы систем автоматического экстренного торможения. Они описали сценарии проведения испытаний, которые в минимальном количестве перекрывают большинство возможных ситуаций потенциально возможных столкновений. Также были проведены тесты, которые показали, что в одной и той же экстренной ситуации поведение разных водителей может сильно отличаться. У молодых участников эксперимента (от 18 до 30 лет) в среднем время реакции занимало 1 секунду, а эффективность использования тормозного привода в среднем 80 %. У взрослых людей (старше 60) время реакции в среднем занимало 2 секунды, а эффективность использования тормозного привода в среднем 70 %. В результате исследования было выявлено, что необходимо стандартизировать тестовые сценарии, разработать стандартизированную цель для столкновения, ввести стандартные методы оценки эффективности работы данных систем, ввести стандартные методы оценки сценария поведения водителя в экстренной ситуации.

Qiang Chen, Miao Lin, Bing Dai и Jiguang Chen [43] вывели наиболее типичные сценарии несчастных случаев с участием пешеходов в Китае и изучили способы предотвращения подобных аварий либо смягчения их последствий с помощью системы автоматического экстренного торможения. Для решения этой задачи они проделали работу сбора данных случившихся ДТП с участием пешеходов и собрали статистическую информацию для анализа поведения водителей и пешеходов непосредственно перед случившейся аварийной ситуацией для последующего анализа и выявления

возможных причин ДТП с целью улучшения алгоритма работы системы автоматического экстренного торможения с целью прогнозирования возможной аварийной ситуации. Использованные данные были собраны из множества источников, в том числе из экспертиз дорожной полиции. В целях более точных статистических данных, информация собиралась из различных регионов Китая. По результатам на 358 происшествий 291 (81 %) случай был детектирован на сухой поверхности дороги и 42 (12 %) на мокрой поверхности, остальные были на обледенелой поверхности (6 %) и на поверхности снежного покрова (1 %). Полученные результаты показывают, что более 50 % наездов на пешеходов случалось тогда, когда пешеходы находились на проезжей части автомобильных дорог в неустановленных местах.

Происшествия подобных сценариев говорят о позднем обнаружении пешеходов, возможном приложении недостаточного тормозного усилия, неэффективных действиях водителя для предотвращения столкновения в экстренной ситуации. При несвоевременной реакции система автоматического экстренного торможения активирует замедление автомобиля, что должно предотвратить столкновение, либо минимизировать негативные последствия.

Ping-Min Hsu, Ming Hung Li, Kuo-Ching Chang в работе [44] рассмотрели случаи, когда неправильная работа САЭТ может служить причиной ДТП. По результатам работы был сделан вывод, что на сегодняшний день наиболее надежным и доступным техническим решением для обнаружения возможного препятствия является использование радара, расположенного в районе переднего бампера автомобиля. Это связано с его относительно невысокой стоимостью, высокой дальностью обнаружения, малой зависимостью от погодных условий.

Разумеется, такое техническое решение не может обойтись без недостатков. Самый большой и опасный недостаток данной системы заключается в высокой вероятности ложноположительного обнаружения

препятствия и, соответственно, ложного срабатывания системы автоматического торможения автомобиля [45].

Случай подобного ДТП был зарегистрирован в Китае в 2013 году. На автомобиле, где была установлена система автоматического экстренного торможения, произошло ложное детектирование препятствия. В следствие этого произошел удар с позади идущим автомобилем. Чтобы избежать этого и снизить риск ложного срабатывания было предложено использовать дублирование системы распознавания препятствия, используя радарное зрение совместно с распознаванием объектов фронтальной камерой.

Также было выявлено, что необходимо проводить большее количество тестов в виртуальной среде для настройки и калибровки алгоритмов обнаружения цели.

I-Hsuan Lee и Bi-Cheng Luan в работе [46] рассмотрели алгоритм, который должен обезопасить ТС от столкновения с позади идущим автомобилем при срабатывании САЭТ. Один из типичных сценариев активации системы – это автоматическое торможение автомобиля, когда датчиками зафиксировано резкое торможение автомобиля, идущего спереди. Следующий позади автомобиль может совершить столкновение в заднюю часть автомобиля с установленной системой САЭТ, причинив ущерб или ранив пассажиров.

В то время, как обычная система автоматического экстренного торможения помогает автомобилю избежать столкновение только с впереди идущим транспортным средством, она может создать аварийную ситуацию для автомобиля, идущего позади.

Во избежание ДТП или смягчения негативных последствий столкновения сразу нескольких транспортных средств, в рамках их работы была предложена модель контроля дистанции и скорости движения не только лидирующего, но и позади идущего автомобилей, представленная на рисунке 1.2.

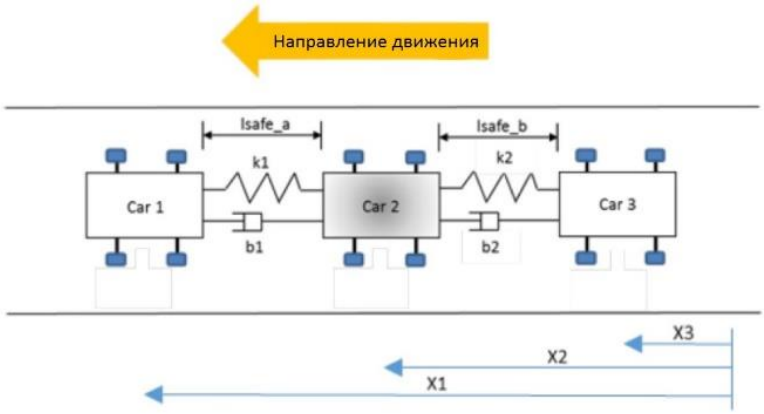


Рисунок 1.2 – Модель контроля движения с тремя ТС

В результате разработанного алгоритма, автомобиль с автоматическим экстренным торможением может в процессе срабатывания корректировать своё замедление и избежать или минимизировать последствия столкновения как с впереди идущим, так и позади идущим транспортным средством.

Из вышеизложенного обзора работ по теме исследования САЭТ можно утверждать, что на сегодняшний день основная масса проводимых научных исследований по системам автоматического экстренного торможения проводится за рубежом, но поскольку система САЭТ напрямую связана с торможением и тормозной динамикой автомобиля, то ее исследование и разработка просто невозможны без проведенных работ по части тормозной системы такими учеными, как:

Ахметшин А.М., Балакин В.Д., Барашков А.А., Бойко А.В., Бузников С.Е., Гольд Б.В., Горелов В.А., Гуревич Л.В., Дик А.Б., Дыгало В.Г., Жилейкин М.М., Иванов А.М., Илларионов В.А., Котиев Г.О., Кристальный С.Р., Куликов И.А., Мальцев Н.Г., Меламуд Р.А., Нефедьев Я.Н., Мордашев Ю.Ф., Науменко Б.С., Попов А.И., Ревин А.А., Рязанцев В.А., Сайкин А.М., Селифонов В.В., Сорокин В.Г, Фаробин Я.Е., Чудаков Е.А.,

а также зарубежными учеными Kindl W., Lister R, Gauss F., Henker E. и др.

Также невозможно разрабатывать систему САЭТ без изучения работ по механизму взаимодействия пневматической шины с опорной поверхностью.

По работе в этой области хотелось бы отметить таких ученых, как: Зотов Н.М., Бухин Б.Л., Давыдов А.Д., Кузнецов Ю.В., Морозов М.В., Pacejka H.B. и др.

1.3 **Методы исследования САЭТ**

Основным видом исследования САЭТ является проведение дорожных испытаний по определенным тестовым сценариям. Одной из наиболее популярных программ по проведению испытаний и оценке данных систем является Европейская программа по оценке новых автомобилей (EuroNCAP).

Проведение испытаний в программе оценки EuroNCAP проходит по протоколам предусмотренных тестовых сценариев, которые призваны имитировать наиболее распространенные дорожные ситуации столкновений. Столкновения имитируются с автомобилем, взрослым пешеходом, ребенком и велосипедистом.

В испытаниях с автомобилями, когда один автомобиль приближается к другому сзади, рассматриваются три сценария:

- целевой автомобиль неподвижен;
- целевой автомобиль движется медленнее тестируемого;
- целевой автомобиль замедляется плавно и резко на различных расстояниях впереди тестируемого [47].

Для первых двух сценариев (неподвижный и медленно движущийся целевой автомобиль) испытания повторяются для смещения слева и справа, при котором осевая линия целевого автомобиля не совпадает с осевой линией тестируемого автомобиля.

С 2020 года испытания систем автоматического экстренного торможения стали включать в себя еще один обязательный сценарий. В этом случае тестируемый автомобиль поворачивает (например, на второстепенную дорогу), пересекая траекторию движения встречного автомобиля. В ходе теста скорости тестируемого автомобиля и приближающегося целевого меняются, при этом баллы присуждаются с учетом того, насколько эффективно система АЕВ обнаруживает встречную угрозу и своевременно останавливает

автомобиль. Поскольку в ходе этих тестов сенсоры проверяемого автомобиля могут распознавать различные части ведущего автомобиля-цели, испытания и сертификация САЭТ проводятся при помощи специального макета с дистанционным управлением Global Vehicle Target (GVT), представленном на рисунке 1.3.

Данная мишень-цель представляет собой сборную конструкцию в виде легкового автомобиля. ИК-отражательная способность поверхностей которого указана в таблице 1 и должна быть в диапазоне длин волн от 850 до 910 нм.

Рисунок 1.3 – Мишень автомобиля-цели для испытаний АЕВ

Таблица 1 – Возвратно-отражающая способность

№	Область	Коэффициент отражения ИК-излучения, %
1	Белый винил (без графики)	> 70
2	Лобовое стекло, темная зона	40 - 70
3	Лобовое стекло, светлая зона	> 70
4	Боковые зеркала	> 70

№	Область	Коэффициент отражения ИК-излучения, %
5	Боковая панель	> 70
6	Боковые окна	> 70
7	Шины и протектор	10 - 40
8	Задний бампер (неокрашенные части)	<10
9	Заднее стекло, световая зона	> 70
10	Черная ткань (юбки, колесные арки)	<10

В описанных тестах высший балл присуждается тем моделям автомобилей, системы автоматического экстренного торможения которых способны избежать столкновения в условиях тестирования либо значительно уменьшить последствия аварии. Вместе с этим нужно иметь в виду, что САЭТ является вспомогательной и ответственность за безопасность движения лежит на плечах водителя. В сложных дорожных ситуациях срабатывание САЭТ может оказаться недостаточно эффективным, либо она сработает несвоевременно и не позволит полностью избежать аварии, но при этом скорость удара может быть значительно снижена. Эффективная защита пассажиров остается критически важной для предотвращения серьезных последствий аварии. На низких скоростях при тестировании с неподвижным целевым автомобилем оценивается только работа функции автоматического торможения, поскольку в подобной ситуации слишком мало времени, чтобы предупреждение водителя оказалось эффективным [48].

При проведении испытаний по сценариям, предполагающим высокие скорости движения, используется другой тип мишени. В данном случае автомобиль-цель является неким подобием надувного прицепа, который буксирует вспомогательный автомобиль. Вид данной мишени представлен на рисунке 1.4.

Рисунок 1.4 – Мишень для проведения испытаний на высоких скоростях

На испытания с попутно двигающимся автомобилем-целью предусмотрено 3 разновидности сценариев: CCRs, CCRm, CCRb. Сценарии по протоколам EuroNCAP предполагают отдельно проверку функции AEB – системы автоматического торможения и функции FCW – системы предупреждения водителя об опасности столкновения [49].

Ниже представлены таблицы с градацией скоростей, дистанций и замедлений по данным сценариям. Шаг тестируемых скоростей срабатывания функций равен 10 км/ч.

Сценарии CCRs предполагают имитацию столкновения со стационарным автомобилем-целью.

	CCRs			
	AEB+FCW		Только AEB	Только FCW
	AEB	FCW		
AEB город	10-50км/ч		10-50км/ч	
AEB трасса		30-80 км/ч	30-80 км/ч	30-80 км/ч

Сценарии CCRm предполагают имитацию столкновения с равномерно двигающимся автомобилем-целью.

	CCRm			
	AEB+FCW		Только AEB	Только FCW
	AEB	FCW		
AEB трасса	30-70км/ч	50-80 км/ч	30-80 км/ч	50-80 км/ч

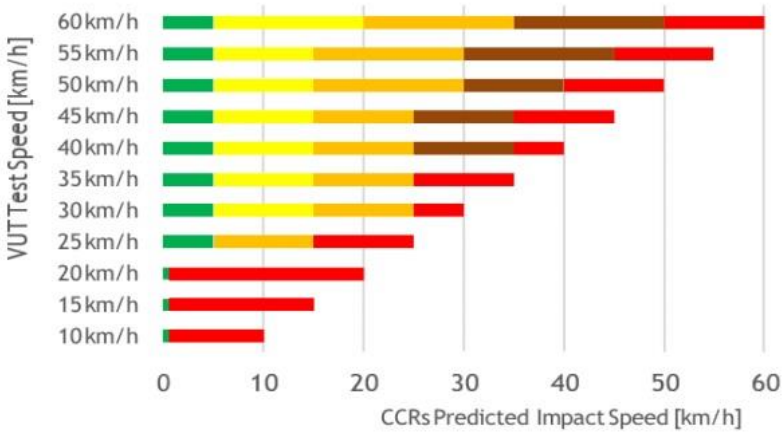
Сценарии CCRb предполагают имитацию столкновения с двигающимся автомобилем-целью, который совершает замедление.

		CCRb	
		AEB+FCW комбинировано + AEB и FCW отдельно	
		$2\ м/с^2$	$6\ м/с^2$
AEB - трасса	12м	50км/ч	50км/ч
	40м	50км/ч	50км/ч

На рисунке 1.5 представлена диаграмма, на которой изображена градация выставления оценок в зависимости от уровня компенсации скорости столкновения.

Для каждого цвета диаграммы применяются следующие коэффициенты по результатам тестов:

- зеленая зона 1.00;
- желтая зона 0.75;
- оранжевая зона 0.50;
- коричневая зона 0.25;
- красная зона 0.00.



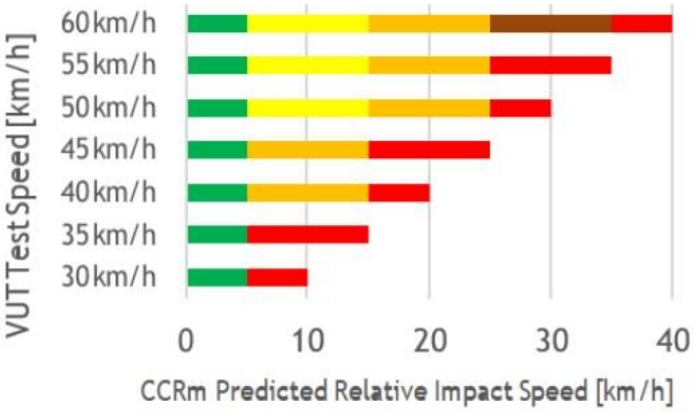


Рисунок 1.5 – Таблица распределения баллов EuroNCAP

1.4 **Испытания с пешеходами**

Для обнаружения пешеходов EuroNCAP проверяет три сценария дорожно-транспортных происшествий, в которых пешеход пересекает путь непосредственно перед тестируемым автомобилем.

Пешеход идет в том же направлении, что и транспортное средство, как показано на рисунке 1.6. Скорость пешехода 5 км/ч, скорость испытуемого автомобиля от 20 до 60 км/ч.

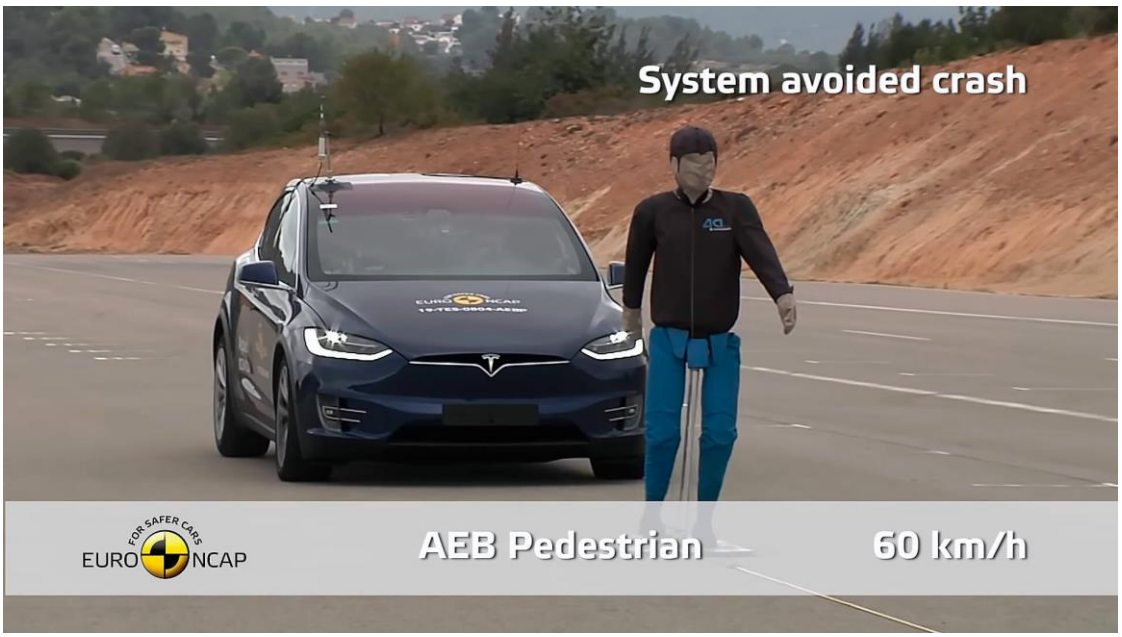


Рисунок 1.6 – Испытание САЭТ с пешеходом

Испытания с пешеходом, переходящим дорогу.

В данном тесте есть 3 основных сценария:

– пешеход переходит дорогу справа налево со скоростью 5 км/ч;

– пешеход перебегает дорогу слева направо со скоростью 8 км/ч;

– пешеход переходит дорогу справа налево из-за припаркованного автомобиля со скоростью 5 км/ч [50].

Все вышеприведенные тесты проводят и в ночное время суток в условиях неосвещенной дороги. Схемы проведения испытаний представлены на рисунках 1.7 - 1.10.

Рисунок 1.7 – Схема испытания САЭТ с переходящим дорогу пешеходом

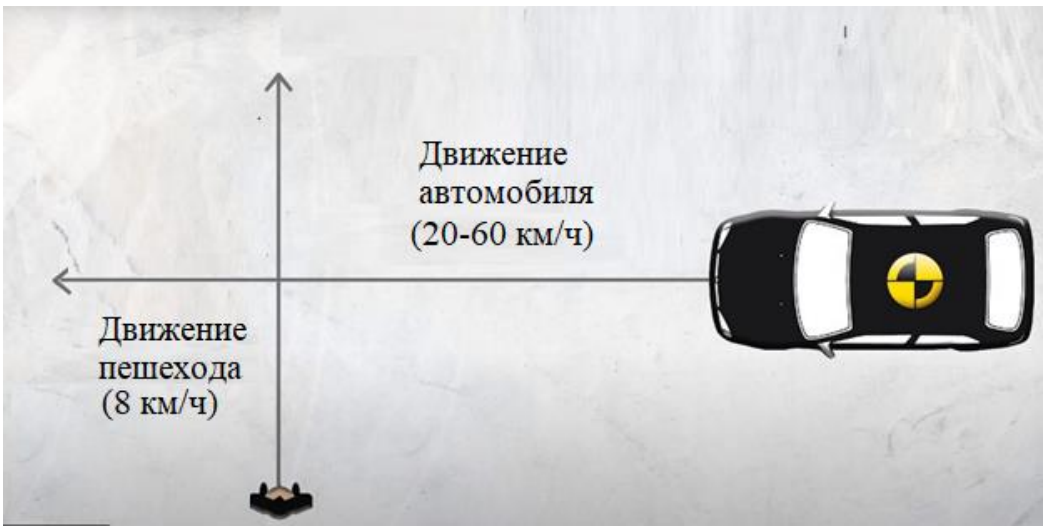


Рисунок 1.8 – Схема испытания САЭТ с перебегающим дорогу пешеходом

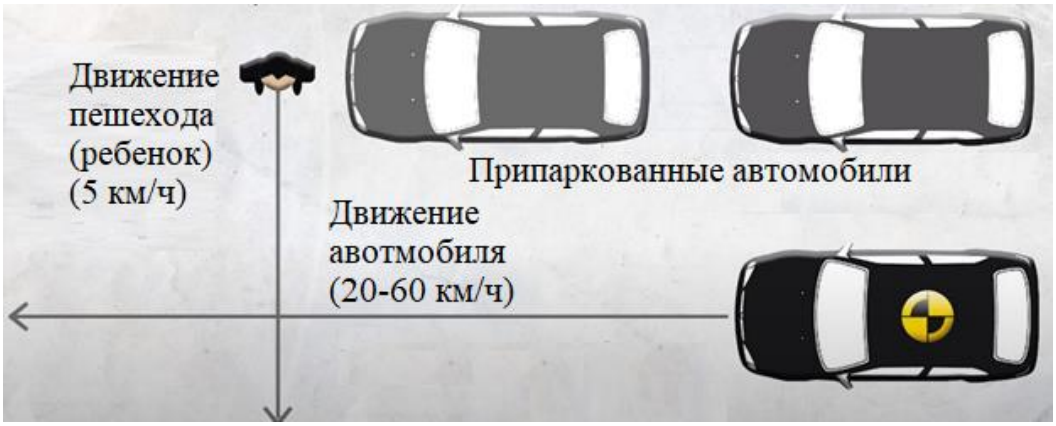


Рисунок 1.9 – Схема испытания САЭТ с перебегающим дорогу ребенком из-за припаркованных автомобилей

Рисунок 1.10 – Визуализация испытания САЭТ на неосвещенной дороге в темное время суток

Новым видом проведения испытаний САЭТ по методике EuroNCAP является проверка срабатывания системы при выполнении маневра поворота на перекрестке. Система должна обнаружить и не допустить столкновения со встречным автомобилем при повороте налево, а также избежать наезд на пешехода при повороте направо [51].

Рисунок 1.11 – Схема испытания САЭТ при выполнении маневра поворота на перекрестке.

Производители автомобилей, участвующие в тестах оценки САЭТ по протоколам EuroNCAP, финансируют 20 верификационных испытаний, а также имеют возможность финансировать дополнительные испытания: 10 для AEB и 10 для FCW. Результат определяется путем отношения результатов теста к результатам, предполагаемым автопроизводителем изначально. Это соотношение является корректирующим коэффициентом:

Корректирующий коэффициент = (балл реального испытания)/ (предполагаемый балл автопроизводителя).

Требования к внешним условиям проведения тестов EuroNCAP являются практически идеальными для эффективной работы системы. Испытания проводятся на сухой асфальтированной поверхности с равномерным уклоном не более 1 % и высоким значением коэффициента сцепления. Температура

окружающего воздуха должна быть от плюс 5 °С и выше, без осадков, видимость не менее 1000 м [52].

Несомненно, при таких внешних условиях САЭТ может иметь высокие показатели эффективности работы, но в реальных условиях, а особенно в сложных дорожно-климатических условиях регионов России подобная система тестирования не может отражать реальную эффективность работы системы. Даже небольшие изменения погодных условий в виде дождя могут увеличить тормозной путь автомобиля на несколько метров, которых не хватит для предотвращения столкновения.

Основываясь на климатических и дорожных условиях эксплуатации ТС в России, создается национальная система испытаний автомобильных систем безопасности под названием RuNCAP. Четырехстороннее соглашение об этом 9 ноября 2018 года подписали Росстандарт, ФГУП «НАМИ», "Авторевю" и МАДИ.

Испытания в рамках RuNCAP будут проводиться добровольно и по стандартам, учитывающим специфику эксплуатации транспорта в РФ. RuNCAP будет формировать национальный рейтинг автомобилей, прошедших подтверждение соответствия повышенным требованиям безопасности [53-55].

Испытания, проходящие в рамках протоколов RuNCAP должны будут иметь усложненные методики оценки систем, максимально приближенные к реальным условиям эксплуатации автомобилей и учитывать особенности дорожно-климатической зоны России.

1.5 **Обоснование для разработки системы автоматического экстренного торможения для отечественных автомобилей**

Повышение безопасности автомобилей и предотвращение дорожно-транспортных происшествий остается одной из важнейших задач автомобильной отрасли. Работы в сфере автомобильной безопасности привели к появлению и повсеместному распространению систем пассивной и активной

безопасности транспортных средств, что позволяет ежедневно сохранять огромное количество жизней и здоровье людей.

Из истории развития, распространения и внедрения различных систем безопасности автомобиля, как например антиблокировочная тормозная система автомобиля и система курсовой устойчивости, которые в момент их появления были установлены только на премиальные версии автомобилей, сейчас получили широкое распространение, вплоть до бюджетного сегмента производимых автомобилей.

Как правило, вновь разрабатываемые активные системы безопасности на первом этапе появления имеют низкую эффективность и дороги в производстве, поэтому они имеют ограниченный спрос и ограниченный рынок. К тому же, не всегда сразу очевиден размер рынка в будущем. Поэтому одним из направлений анализа является изучение того, какая из функций новой системы может создать массовую потребность и спрос.

После нескольких лет производства и установки новых систем на премиальных автомобилях они становятся дешевле и распространяются на модели массового производства. Происходит это по вполне ясной стратегии по причине таких факторов, как:

– удешевление за счет конструкторского совершенствования;
– удешевление материалов за счет альтернативной технологии производства;
– замены дорогого материала на более дешевый;
– перехода к серийному (массовому) производству.

Это мы можем наблюдать на примере развития системы автоматического экстренного торможения, которая в настоящее время устанавливается на такие автомобили массового сегмента, как: Ford Focus, Opel Insignia, Skoda Octavia и др. [56]. Несмотря на внедрение САЭТ в массовое производство автомобилей на европейском рынке, по состоянию на сегодняшний день иностранные автомобильные концерны с большой осторожностью берут на

себя ответственность гарантировать эффективность работы системы автоматического экстренного торможения в повседневной эксплуатации автомобиля в дорожно-климатических условиях РФ.

Начиная с 2016 года европейская компания EuroNCAP наряду с основным перечнем систем активной безопасности автомобиля начала проводить тестирование и систем автоматического экстренного торможения.

Градацией оценки безопасности автомобиля является количество присужденных звезд (от 0 до 16). В том же году было принято решение оценивать систему на максимальное количество баллов только в том случае, если на автомобиле присутствует система предупреждения о столкновении и автоматическое экстренное торможение. В итоге получается так, что если автомобиль идеально прошел испытания систем пассивной безопасности, но на нем отсутствует система предупреждения о столкновении и автоматическое экстренное торможение, то автомобиль не получит высшую оценку. В дальнейшем это сказывается на продажах и популярности конкретной модели.

В России автомобили производят такие компании, как: ВАЗ, ГАЗ, КамАЗ, УАЗ. Разработка и распространение систем интеллектуальной безопасности автомобилей, а в частности системы автоматического экстренного торможения, необходима для развития производства автомобилей и обеспечения конкурентоспособности в условиях современного рынка. Помимо сохранения огромного количества жизней и здоровья людей, современный автомобиль с трудом можно представить без интеллектуальных систем помощи водителю, тем более в перспективах производства бизнес и премиум сегмента. Толчком к внедрению новых технологий и интеллектуальных систем помощи водителю в отечественном производстве стал проект Единая модульная платформа «ЕМП» ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», где в составе производимых моделей автомобилей должны присутствовать интеллектуальные системы помощи при вождении.

1.6 **Выводы по главе. Цель и задачи исследования**

Анализ статистики дорожно-транспортных происшествий и ряда исследовательских работ по изучению систем активной безопасности автомобилей и систем автоматического экстренного торможения позволяет сделать следующие выводы:

1. Выявлена актуальность разработки адаптивного алгоритма функционирования системы автоматического экстренного торможения, с целью повышения эффективности работы системы автоматического экстренного торможения транспортных средств в условиях эксплуатации, характерных для различных дорожно-климатических зон на территории Российской Федерации.

2. Анализ последствий влияния погодно-климатических условий на поверхность дорог показывает, что для эксплуатации автомобилей характерна различная степень неравномерного распределения сцепления, как в поперечном, так и в продольном направлениях, что обуславливает потребность в совершенствовании систем автоматического экстренного торможения для обеспечения требуемой безопасности движения.

3. Конкурентоспособность автомобилей отечественного производства к зарубежным аналогам возможно обеспечить путем внедрения в производство систем автоматического экстренного торможения для прохождения обязательной сертификации в странах европейского союза, где наличие системы автоматического экстренного торможения является обязательным условием.

4. Отмечено, что работа существующих систем автоматического экстренного торможения не обеспечивает требуемого уровня эффективности предотвращения столкновений и их последствий в сложных дорожно-климатических условиях.

Полученные выводы позволяют сформулировать цель диссертационного исследования: повышение активной безопасности автомобиля на основе

синтеза адаптивного алгоритма функционирования системы автоматического экстренного торможения.

Достижение указанной цели может быть реализовано на основе решения следующих задач:

– разработать уточненную математическую модель функционирования системы автоматического экстренного торможения, учитывающую сценарии поведения автомобиля-лидера, функционирование сенсорно-аппаратной части, конфигурацию систем активной безопасности автомобиля;

– обосновать методику прогнозирования коэффициента сцепления колес автомобиля с опорной поверхностью в сложных дорожно-климатических условиях;

– синтезировать адаптивный алгоритм функционирования системы автоматического экстренного торможения и разработать средства его реализации;

– провести экспериментальное исследование с оценкой достоверности прогнозирования коэффициента сцепления, времени срабатывания тормозного привода, времени достижения установившегося замедления и тормозного пути в сложных дорожно-климатических условиях;

– провести технико-экономическую оценку результатов исследования и разработать рекомендации по повышению эффективности функционирования систем автоматического экстренного торможения.

2 Разработка математической модели функционирования САЭТ

2.1 Общие аспекты разработки математической модели для создания и проверки алгоритма САЭТ

В работе ставится задача исследования функционирования алгоритма системы автоматического экстренного торможения. Поскольку данная система воздействует непосредственно на тормозную систему автомобиля, то при построении модели необходимо рассматривать зависимости и возмущения, возникающие в процессе торможения колесного транспортного средства.

В начале построения модели рассмотрим процесс торможения автомобиля в общем виде. Торможение – создание и изменение искусственного сопротивления движению автомобиля с целью уменьшения скорости движения либо удержания его в неподвижном состоянии [57]. В процессе торможения автомобиля уменьшается (или полностью рассеивается) энергия, накопленная в процессе движения и достижения необходимой скорости или преодоления уклона [58].

Динамику торможения автомобиля массой m, движущегося с начальной скоростью V_0 можно представить в виде уравнения:

$$F_j = F_w + \sum R_x, \tag{1}$$

$$F_j = m * j, \tag{2}$$

где:

F_j – сила инерции автомобиля;

j – замедление автомобиля;

F_w — результирующая аэродинамическая сила, приложенная в центре масс автомобиля;

$\sum R_x$— суммарные продольные реакции в контактах колес с дорогой для передней и задней оси.

Суммарные продольные реакции для n тормозящих колес, отсоединенных от двигателя, при движении автомобиля по ровной горизонтальной дороге, находим по уравнению:

$$\sum_{i}^{n} R_{xi} = \frac{1}{r_{\text{ко}}}\left(\sum_{i}^{n} M_{Ti} + \sum_{i}^{n} J_{Ki} * \frac{d\omega_{\text{к}}}{dt}\right) + f * \sum_{i}^{n} R_{Zi}\ , \qquad (3)$$

где

$i = 1, 2, \ldots, n$;

M_T – момент, создаваемый тормозным механизмом;

$r_{\text{ко}}$ – радиус качения колеса в ведомом режиме;

J_K – момент инерции колеса, относительно оси его вращения;

$\frac{d\omega_{\text{к}}}{dt}$ – угловое ускорение колеса;

f – коэффициент сопротивления качению;

R_{Zi} – нормальная реакция опорной поверхности дороги;

R_{φ}– реакция, реализованная по сцеплению шин с дорогой.

Суммарная реакция $\sum R_{\varphi}$, реализованная по сцеплению шин автомобиля с дорогой, определяется уравнением:

$$\sum R_{\varphi} = \sum R_{\text{z}} * \varphi_x, \qquad (4)$$

Коэффициент сцепления φ_x шин в продольном направлении зависит от режима торможения колеса. Максимальное значение коэффициент φ_x сцепления колеса с опорной поверхностью наступает при экстренном торможении, когда продольные касательные реакции достигают максимальных значений R_{Xmax} [59].

Коэффициент продольного сцепления, соответствующий началу проскальзывания заторможенного колеса, используют при вычислении тормозного пути автомобиля, и он зависит от:

– типа и состояния покрытия;
– конструкции и материала шин;
– давления в них воздуха;
– нагрузок на колесо;
– скоростей движения;
– температурных условий.

Основным параметром в расчете тормозного пути автомобиля в режиме экстренного торможения является коэффициент сцепления [60-63]. С учетом принятых допущений, установившееся замедление транспортных средств при полном использовании сцепления автомобиля имеет вид:

$$j_{\text{уст}} = \varphi * g, \tag{5}$$

где

φ – коэффициент сцепления шин с опорной поверхностью;

g – ускорение свободного падения.

Исходя из формулы 5, в расчете величины замедления автомобиля в процессе экстренного торможения играют роль параметры φ и g . Поскольку g является константой, а коэффициент φ является переменным, то прогнозирование этого коэффициента является одной из основных задач в разработке усовершенствованной модели САЭТ.

2.2 **Математическая модель движения впереди идущего и испытуемого транспортных средств**

Система автоматического экстренного торможения представляет собой такую систему, которая должна автоматически активировать торможение для предотвращения столкновений с препятствиями в передней полусфере. Исходя из данной специфики работы, наиболее продуктивно создать модель имитации движения двух ТС – впереди идущего и испытуемого.

Модель движения автомобилей должна состоять из измерения дистанции в зависимости от скорости и ускорения идущего впереди ТС и отработки замедления алгоритмом САЭТ исследуемого ТС.

Наиболее подходящей схемой математической модели для исследования алгоритма функционирования САЭТ является система «Водитель Автомобиль Дорога Среда» (ВАДС). В частном исследуемом случае вместо типа модели «человек-автомобиль» с обратной связью будет анализироваться алгоритм САЭТ. В системе регулирования с обратной связью выходной сигнал сравнивается с входным сигналом. На базе данного принципа производится построение движения колонны автомобилей (лидирующего и испытуемого) [64,65]. На рисунке 2.1 даны обозначения наиболее важных элементов системы регулирования.

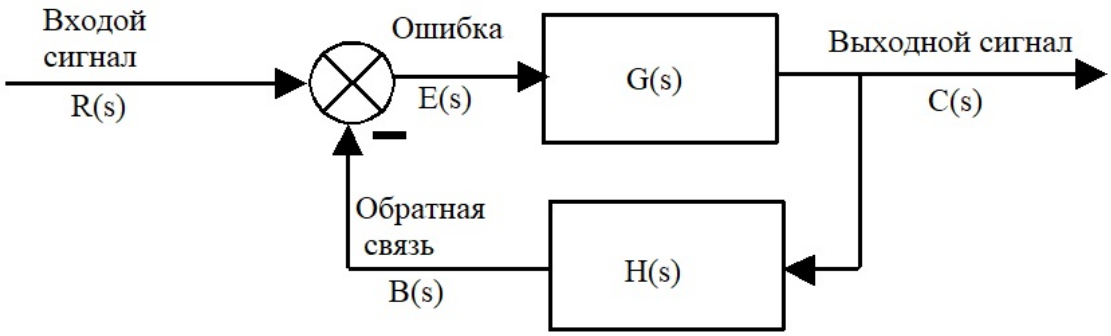


Рисунок 2.1 – Схема регулирования с обратной связью

Передаточная функция G(S) представляет собой математическое описание отношения выходного сигнала элемента или системы ко входному сигналу. Характеристики регулирования с обратной связью можно выразить следующими уравнениями

$$E(s) = R(s) - H(s)C(s); \quad (6)$$

$$C(s) = E(s)G(s). \quad (7)$$

Решая эти уравнения для отношения между выходным и входным сигналами, получаем передаточную функцию T [66,67].

$$T = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)}; \quad (8)$$

Задача математической модели ведущего и исследуемого автомобилей состоит в том, что рассчитываемые параметры движения должны находиться в одной системе координат и иметь входные и выходные настраиваемые параметры, с высокой точностью описывать динамику движения транспортных средств в колонне.

Математическая модель движения двух автомобилей в колонне имеет следующие основные параметры:

$V_{лид}$ – начальная скорость впереди идущего ТС;

$a_{лид}$ – ускорение впереди идущего ТС;

V – начальная скорость исследуемого ТС;

a – ускорение исследуемого ТС;

$S_н$ – начальная дистанция между ТС;

Схематичный вид построения модели представлен на рисунке 2.2.

Рисунок 2.2 – Общий вид модели движения автомобилей

В построении модели торможения автомобилей предполагается, что у лидирующего и исследуемого автомобилей будет одинаковая возможность достижения максимально возможного значения замедления, поскольку внешние и дорожные условия для них подразумеваются идентичными. Принимая данные условия выразим дистанцию между автомобилями через координаты лидирующего ТС x_i и исследуемого ТС x_{i+1}.

$$x_i(dt) - x_{i+1}(dt) = S_i, \tag{9}$$

где

S_i – дистанция между автомобилями в результате моделирования.

Формула расчета параметров движения автомобиля-лидера и испытуемого автомобиля будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} dx_1(t) = S_1(t) + \int_0^t V_{i+1}(t)dt + S; \\ dx_2(t) = S_2(t) + \int_0^t V_{\text{лид}i+1}(t)dt + S. \end{cases}, \tag{10}$$

где

x_1 – положение испытуемого автомобиля;

x_2 – положение автомобиля-лидера;

S_1 – дистанция, пройденная испытуемым автомобилем;

S_2 – дистанция, пройденная автомобилем-лидером.

В виде модели Simulink уравнение будет иметь вид, представленный на рисунке 2.3.

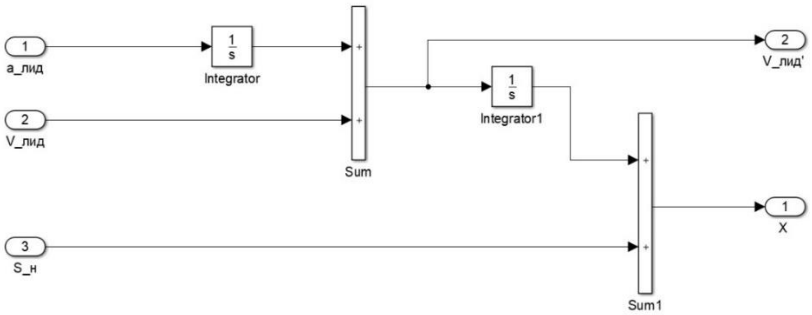


Рисунок 2.3 – Вид модели расчета перемещения автомобиля-лидера

Модель Simulink для расчета перемещения испытуемого ТС имеет вид, аналогичный модели ведущего транспортного средства.

Для проведения моделирования и оценки точности расчета полученной математической модели алгоритма функционирования САЭТ, необходимо создание математической модели имитации потенциально опасных сценариев движения автомобилей, наиболее часто встречающихся на дорогах общего пользования. Сценарии должны охватывать различные ситуации в различных

режимах движения, которые приводят к срабатыванию САЭТ. Сценарии должны включать в себя входные параметры с определенными условиями, характерными различным режимам движения [68-70].

Создание имитационной базы сценариев проводилось на основании проведенных дорожных испытаний и записи данных движения автомобилей на дорогах общего пользования.

Данные собирались с помощью программного обеспечения CANalyzer. В качестве адаптера использовался Vector VN1630, подключенный к CAN-шине автомобиля. На основе данных, полученных на дорогах общего пользования, были сделаны записи изменения дистанции с впереди идущим автомобилем, измеряемая радарным сенсором в реальных условиях движения. На рисунке 2.4 представлен фрагмент записываемых данных при помощи программного обеспечения CANalyzer [71]. На верхнем графике показано изменение дистанции, на нижнем графике – скорость исследуемого автомобиля. Зная скорость собственного транспортного средства можно рассчитать скорости и ускорения впереди идущих автомобилей.

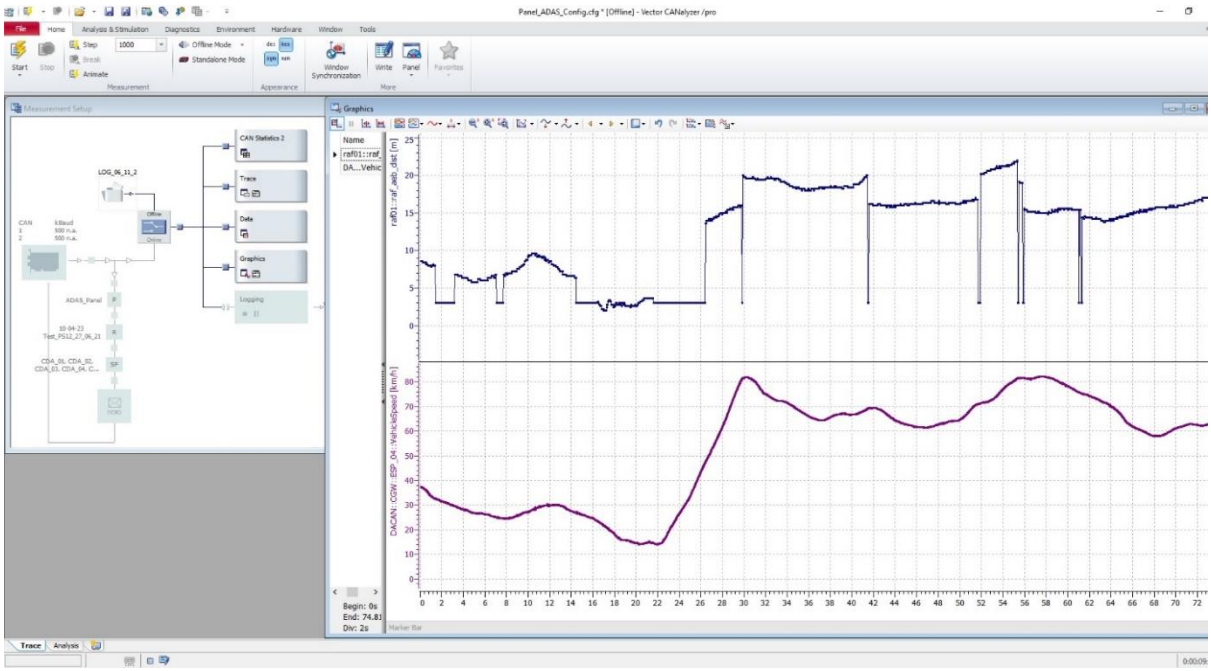


Рисунок 2.4 – Фрагмент записи параметров автомобиля с помощью программы Canalyzer

Для автоматизации расчета была создана модель анализа скорости и ускорений автомобилей. Для этого все записанные лог-файлы были отформатированы в расширение «mat» для его интеграции в алгоритмы Matlab/Simulink [72].

Формула для расчета ускорений автомобилей по радиолокационному описана следующим уравнением:

$$A_{lead}(t) = S(t)H(s) = S(t)\frac{y(s)}{u(s)}, \tag{11}$$

где

y – выходное значение модели передаточной функции;

u – входное значение модели передаточной функции.

Общий вид модели расчета в среде Simulink представлен на рисунке 2.5.

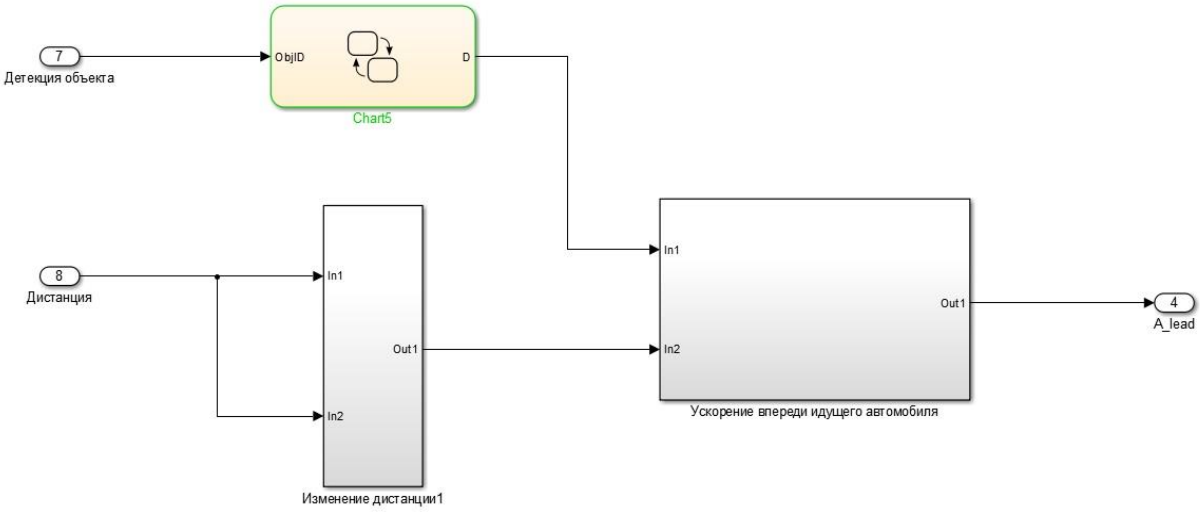


Рисунок 2.5 – Общий вид модели расчета ускорения в Simulink

Т.к. алгоритм работает только на сближение, то для фильтрации ускоряющихся ТС был сделан расчет, описанный неравенством:

$$(S_t - S_{t-1})t/dt > 0, \tag{12}$$

где S_t и S_{t-1} – значения дистанции в текущий и предыдущий такт программного моделирования, а dt - тактовая частота моделирования. Расчет в модели Simulink имеет вид, представленный на рисунке 2.6 и 2.7.

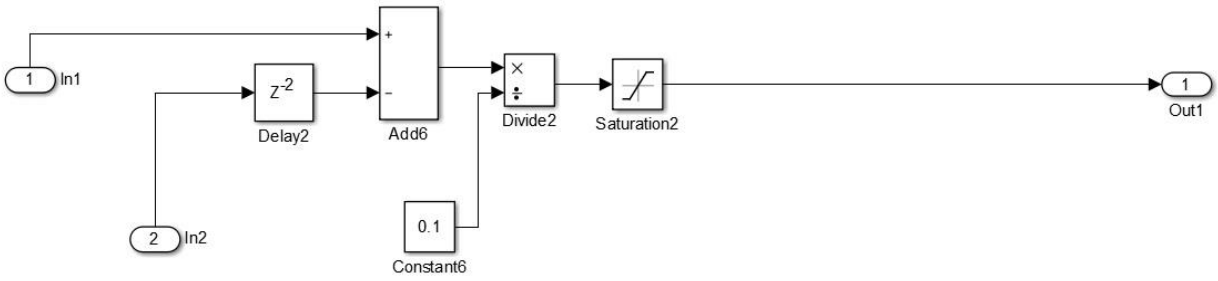


Рисунок 2.6 – Вид модели Simulink определения скорости сближения

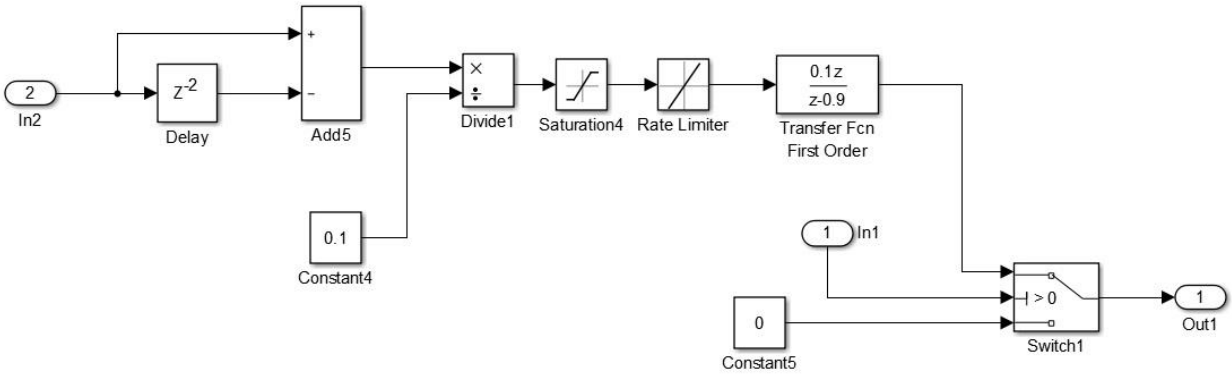


Рисунок 2.7 – Вид модели Simulink расчета относительного ускорения автомобилей

На основе записанных данных были проанализированы значения замедления автомобилей в различных сценариях движения на дорогах общего пользования. По этим данным выведена определенная статистика замедлений ТС, представленная в таблице 2.

Таблица 2 – Средние данные замедлений автомобилей на дорогах общего пользования

Общее количество торможений, %	Значение замедления, м/с^2
55	-1
30	-2
20	-3
5	-4

Исходя из проведенного анализа собранных данных сформирован набор минимально необходимых параметров по сценариям имитации движения, представленный в таблице 3.

Таблица 3 – Определенный набор значений параметров движения для создания сценариев испытаний

Режим движения	Значение замедления, м/с^2	Начальная скорость, км/ч	Дистанция между ТС, м
Загородный	-1…-4	90	30…100
Магистраль	-1…-4	110	40…100
Городской режим	-1…-4	60	15…80
Режим пробки	-1…-2	30	2…25
Стационарный объект	0	0	10…100

В соответствии со значениями, приведенными в таблице 3, был сформирован набор сценариев, имитирующий поведение водителей на дорогах общего пользования.

В стандартной библиотеке Simulink присутствует возможность использования различных генераторов значений. На рисунках 2.8 и 2.9 представлены некоторые примеры блоков, с помощью который можно быстро имитировать поведение ТС.

Генератор пульсирующего сигнала позволяет задавать параметры повторяющегося значения с настраиваемой частотой и амплитудой.

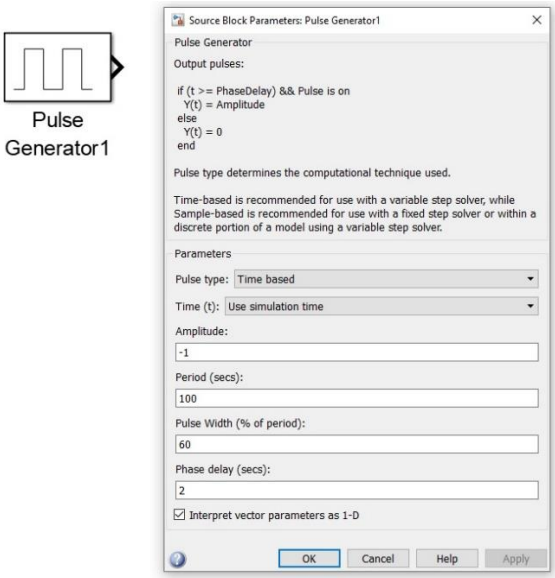


Рисунок 2.8 – Пример блока Pulse Generator

Блок Rate Limiter ограничивает первую производную входного значения. Выходные данные изменяются не быстрее указанного предела, который описывается в следующем виде:

$$rate = \frac{u(i) - y(i-1)}{t(i) - t(i-1)} \tag{13}$$

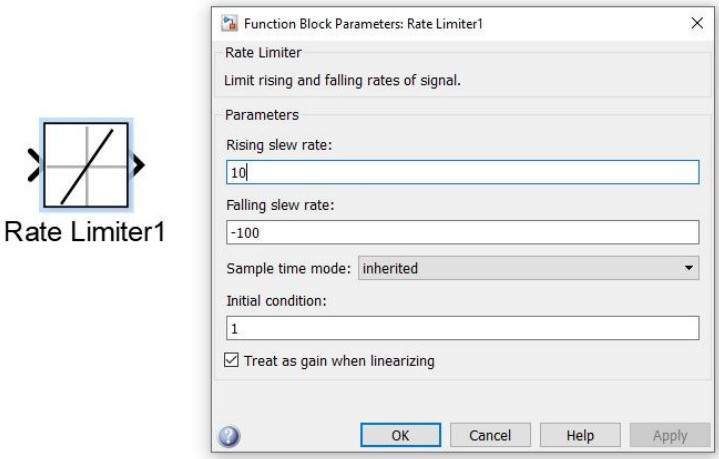


Рисунок 2.9 – Пример блока Rate Limiter

Общий вид модели имитации различных режимов движения лидирующего автомобиля представлен на рисунке 2.10.

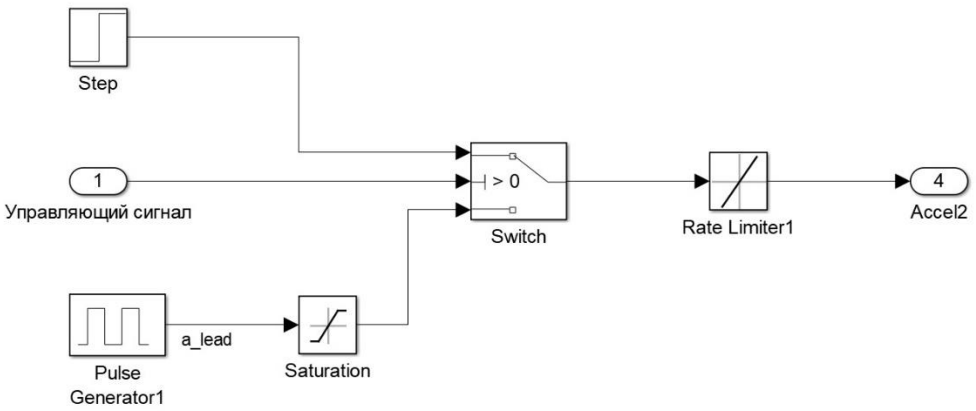


Рисунок 2.10 – Пример модели Simulink имитации поведения водителя лидирующего автомобиля

В данной модели есть возможность переключения между сигналами и работы системы как с постоянным, так и с изменяющимся замедлением. На выходе изменение замедления до установившегося происходит в соответствии с определенными настройками блока ограничения.

2.3 Разработка математической модели имитации данных радарного сенсора

В математической модели расчет дистанции между ТС, двигающимися в колонне, происходит без дискретизации и шума дистанции, характерным для реального сенсора измерения дистанции. В связи с данными особенностями проведение расчетов по синтетически имитируемому сигналу математической модели имеют отличия от данных, характерных реальному радарному датчику при передаче значений дистанции. Для изучения данного вопроса были взяты документы технического описания радара компании Continental ARS408.

В описании данного радарного сенсора, как и у аналогичных, есть набор параметров, характерных для передачи данных. Наиболее важным для построения математической модели является такой параметр, как разрешающая способность и частота передачи пакетов сообщений [73].

Разрешающая способность, или если говорить иначе – минимальный шаг определения дистанции в рассматриваемой документации к радару, является

0,2 метра. Соответственно, необходимо эмулировать сигнал данной дискретизации. Достижение дискретизации было смоделировано округлением приходящего числового значения и последующим его приведением. Поскольку обработка данных радара имеет задержку, то на выходе алгоритма также необходимо добавить блок, имитирующий задержку передачи сигнала. Помимо расчета дискретизации также необходимо ограничить входной сигнал по максимальной дистанции. Далее блоком Rate Transition настраивается скорость пакетов передаваемого сигнала. Математическое описание представлено в следующем виде:

$$S_l \approx (s * 5),$$
$$0 < S < 250, \tag{14}$$
$$S = (S_l * 0.2)(Tstart + Toffset + n * Tsampling),$$

где

S – полученая дистанция;

S_l – сигнал математической модели;

Tstart – время начала симуляции для модели;

Toffset – начальное временное смещение;

n – значение параметра длины задержки блока;

Tsampling – период выборки.

Вид модели Simulink представлен на рисунке 2.11.

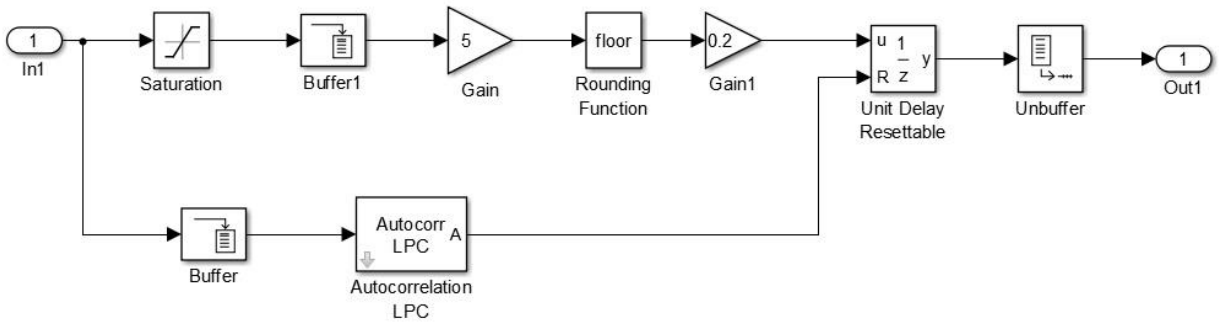


Рисунок 2.11 – Модель имитации данных радара в Simulink

В итоге общий вид модели движения двух автомобилей с добавленным блоком имитации данных радара в среде Simulink представлена на рисунке 2.12.

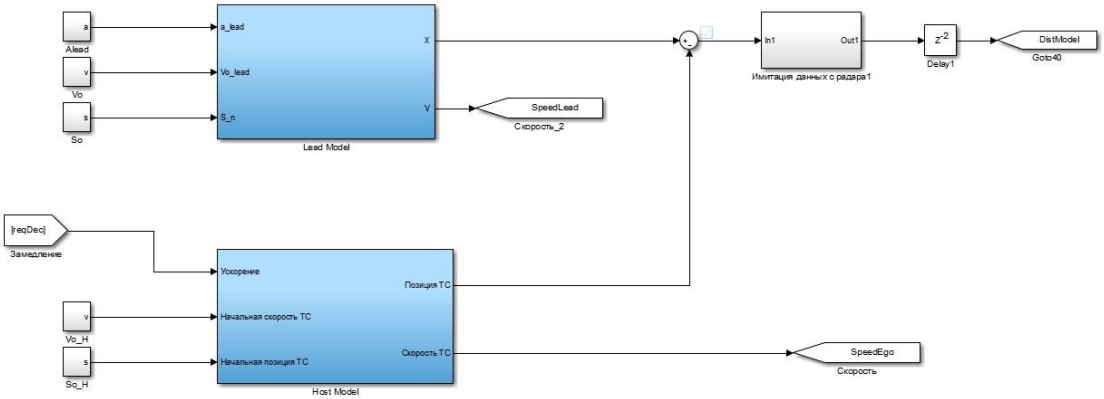


Рисунок 2.12 – Общий вид модели движения двух автомобилей в Simulink

Благодаря подобной имитации сигнала, результат в процессе математического моделирования получается наиболее достоверным и максимально приближенным к реальным условиям.

2.4 **Разработка математической модели прогнозирования коэффициента сцепления колеса с дорожным покрытием в зависимости от внешних дорожно-климатических факторов**

Для определения общего тормозного пути необходимо определить проходимый тормозной путь на каждом этапе работы системы автоматического экстренного торможения. Учитывая специфику работы, можно пренебречь сопротивлением воздуха, сопротивлением качения и прочими факторами, значения которых в данном процессе крайне малы.

Основной переменной для расчета тормозного пути автомобиля в процессе экстренного торможения является φ – коэффициент сцепления колес автомобиля с поверхностью дороги. Соответственно, с помощью прогнозирования текущего значения φ возможно наиболее точно рассчитать тормозной путь автомобиля в различных дорожно-климатических условиях [74-76].

Поскольку основной задачей работы является повышение эффективности работы САЭТ в различных внешних условиях движения, то необходимо создать инструмент, способный прогнозировать текущее значение коэффициента сцепления.

Результаты проведенных исследований эффективности работы САЭТ, описанных в пункте 1.4 данной работы, показывают значительное снижение эффективности работы на опорных поверхностях со средним и низким значением коэффициента сцепления [77].

Исходя из физики протекающего процесса торможения, коэффициент φ довольно сложно определить с необходимой точностью, не прибегая к стадии блокировки колес. Соответственно, одним из наиболее подходящих решений данной задачи можно считать его прогнозирование, основанное на нечеткой логике. В качестве исходных данных прогнозирования коэффициента сцепления решено использовать широкий список входных параметров для более точного определения текущего состояния опорной поверхности, а соответственно, значения φ [78].

Список используемых данных для прогнозирования:

- датчик температуры окружающего воздуха;
- датчик осадков;
- текущий режим работы стеклоочистителя;
- срабатывание антиблокировочной системы;
- срабатывание системы курсовой устойчивости;
- распознавание линий разметки фронтальной камерой.

Более чем на 90 % автомобилях, в составе которых присутствует система автоматического экстренного торможения, установлена фронтальная камера с функцией распознавания дорожной разметки [79]. Поэтому как дополнительный метод контроля состояния дорожного покрытия также было принято решение использовать распознавание линий разметки. Исходя из данных дорожных испытаний, более чем в 80 % случаев при распознавании

линий разметки и соответствующих показаниях датчиков, коэффициент сцепления прогнозировался эффективнее.

Одно из основных качественных отличий разрабатываемого алгоритма расчета тормозного пути от существующих решений заключается в наличии блока прогнозирования коэффициента сцепления на основании расширенного количества опрашиваемых датчиков и систем автомобиля.

Применение жестких критериев оценки некоторых входных данных не может достоверно отражать текущее состояние дорожного покрытия, особенно в переходных режимах. Для решения данной задачи использовались вероятностные расчеты достоверности считываемых параметров для использования в логике прогнозирования [80].

Расчеты вероятностных значений принято использовать для следующих параметров:

- A – срабатывание антиблокировочной системы;
- Z – срабатывание системы курсовой устойчивости;
- D – режим работы стеклоочистителей.

Оценка истинности значений применяется на основе следующего равенства:

$$\begin{cases} \mathrm{A} = \frac{\sum A_i(B)}{n} \\ \mathrm{Z} = \frac{\sum Z_i(B)}{n} \\ \mathrm{D} = \frac{\sum D_i(B)}{n} \end{cases}, \tag{15}$$

где

n – количество считанных срабатываний для принятия истинности входного параметра;

B – коэффициент доверительного интервала, который рассчитывается в следующем виде:

$$B = t\frac{(c-a)\Delta t}{(b+c)-(a+d)}, \quad (16)$$

где

t – необходимая длительность измерительного интервала;

Δt – допуск необходимой длительности интервалов;

a,b – верхний и нижний предел приемлемых интервалов меньше t;

c,d – верхний и нижний предел приемлемых интервалов больше t;

На рисунке 2.13 показана часть модели Simulink прогнозирования тормозного пути, а также часть модели, отвечающая за логику определения коэффициента сцепления.

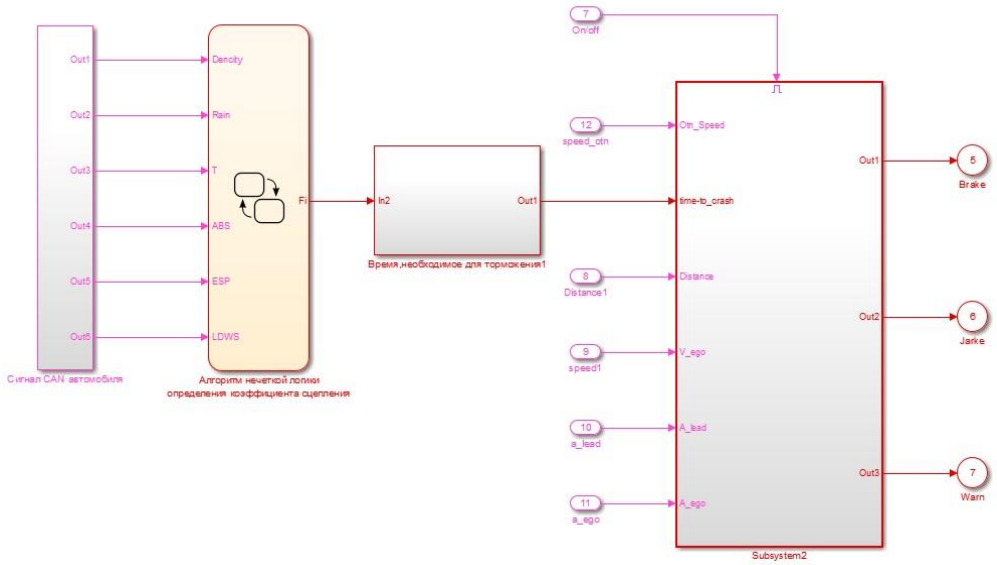


Рисунок 2.13 – Общий вид модели прогнозирования тормозного пути

На входные данные алгоритма поступает информация от датчиков автомобиля с текущими параметрами движения. Для этого введен блок считывания необходимых входных сигналов CAN-шины автомобиля. Далее эти сигналы поступают в блок, где реализован алгоритм нечеткой логики для определения текущего коэффициента сцепления. Аппарат нечеткой логики был применен исходя из того, что прогнозирование текущего коэффициента сцепления колеса с дорожным покрытием со стороны водителя происходит из накопленного опыта и сопоставления внешних факторов, наблюдения за

которыми ведут к корректировкам в управлении транспортным средством посредством сопоставления нечетких множеств [81].

2.5 **Описание примененного алгоритма прогнозирования коэффициента сцепления на базе применения аппарата нечеткой логики.**

Поскольку для реализации алгоритма прогнозирования коэффициента сцепления был выбран аппарат нечеткой логики – для начала рассмотрим представление нечеткой логики в общем виде.

Нечеткая логика представляет собой совокупность элементов произвольной природы.

Для выражения этой принадлежности можно использовать и другое понятие –характеристическую функцию μ_{A} *(x)*, значения которой указывают, является ли (да или нет) *x* элементом *A*:

$$\mu_{\mathrm{A}}(x) = \begin{cases} 1, \text{если } x \in A; \\ 0, \text{если } x \notin A. \end{cases}$$

В представлении нечеткой логики подмножество A универсального множества U должно характеризоваться функцией принадлежности $\mu_{\mathrm{A}}(x)$:U→[0,1], которая сопоставляет в соответствие элементам каждого x∈U число μ_{A}(x) из выбранного интервала [0,1], отражающее степень принадлежности элемента u подмножеству A. Существующие алгоритмы нечеткого вывода в основном различаются по типам используемых правил логической операции и разновидностью метода диверсификации. Наиболее часто используемыми моделями нечеткого вида являются: Мамдани, Сугено, Ларсена, Цукамото [85].

При рассмотрении общего случая нечеткий логический вывод осуществляется за четыре этапа:

1. Нечеткость (введение нечеткости, фаззификация). На данном этапе функции принадлежности, определенные на входных переменных, применяются к фактическим значениям для определения степени истинности каждой предпосылки каждого правила.

2. Логический вывод. Логический вывод включает два подэтапа:

2.1. Агрегация. С помощью агрегации определяется степень истинности всех предпосылок в каждом правиле. Также ее применение нужно, если в полученных правилах больше чем одна предпосылка.

2.2 Активация. Вычисленное значение истинности для всех предпосылок каждого правила применяется к заключениям каждого правила. Это приводит к нечетким множествам, которые будут назначены каждой переменной вывода для каждого правила. На этапе активации происходит обращение к нечеткой базе знаний.

3. Композиция. На данном этапе все подмножества, которые назначены в соответствии с переменными вывода, объединяются, чтобы сформировать единое подмножество, соответствующее каждой переменной вывода. В результате композиции получается нечеткий вывод. Композиция необходима, если нечеткая база знаний включает больше одного правила.

4. Приведение к четкости (дефаззификация). Используется, когда необходимо преобразовать нечеткий набор выводов к четкому аналогу [86].

В качестве математического описания функций принадлежности выходных терм была выбрана треугольная. Графический вид треугольной принадлежности функции представлен на рисунке 2.14.

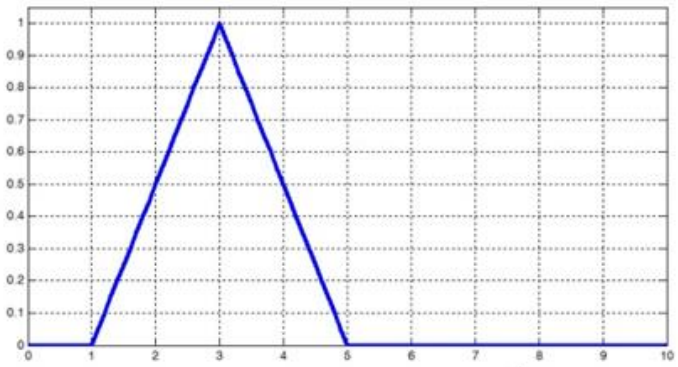


Рисунок 2.14 – Графический вид треугольной функции принадлежности

Данная функция принадлежности нечеткой логики описывается следующим выражением:

$$\mu_{\mathrm{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, b \leq x \leq c; \\ 0,\ x < a \text{ или } x > c. \end{cases} \quad (17)$$

Выходной параметр, определяемый с помощью аппарата нечеткой логики, будет являться вероятным значением коэффициента сцепления φ [87]. Были разработаны правила определения выходного параметра нечеткой логики φ в зависимости от входных условий. Часть разработанных правил представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Правила принадлежности коэффициента сцепления

t°C	Датчик осадков	Датчик интенсивности осадков	ABS	ESP	LDWS	Таймер(мин)	ф
< 0	+	выс.	+	+	-	>5	1
< 0	+	выс.	+	+	+	<5	2
< 0	+	низк.	+	+	+	<5	3
< 0	+	низк.	+	-	+	<5	3
< 0	-	выкл.	-	-	+	-	5
> 0	+	низк.	+	-	+	<5	4
> 0	-	выкл.	+	-	+	<5	4
< 0	-	выкл.	-	-	+	-	5
> 0	-	выкл.	-	+	+	<5	4
> 0	-	выкл.	-	-	+	-	5

Степень детализации объекта зависит от количества терм (разбиений на подмножества). Декомпозиция непосредственно влияет на производительность используемого контроллера вычислительного модуля [88]. На рисунке 2.15 а) показана грубая нечеткая декомпозиция с 3 термами и тремя нечеткими подмножествами. Более детальная декомпозиция с семью подмножествами представлена на рисунке 2.15 б).

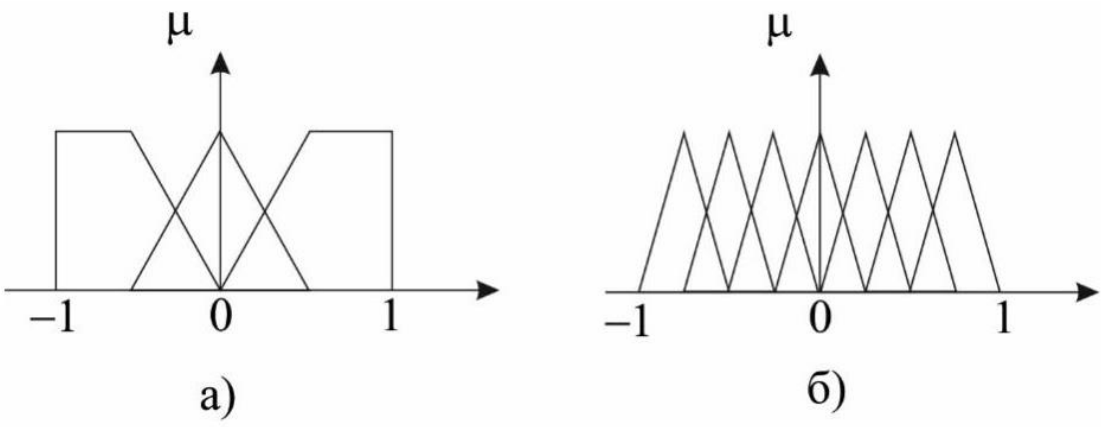


Рисунок 2.15 – Нечеткая декомпозиция а)-грубая, б)-детальная

В разработанном алгоритме прогнозирования САЭТ происходит деление выходных терм на 7 подмножеств, которые соответствуют определенному значению φ [89]. Соответственно, декомпозиция представляет собой детальный набор выходных терм, в диапазоне [0…1] и в итоге имеет следующий вид, представленный на рисунке 2.16.

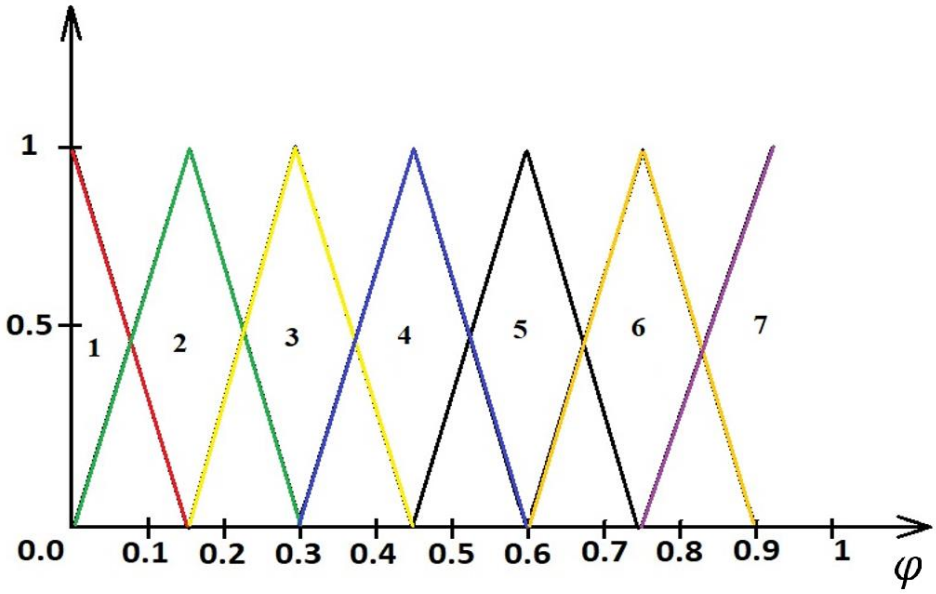


Рисунок 2.16 – Термы выходной переменной прогнозирования φ

Поскольку в перечне входных параметров нечеткой логики фигурирует время, то было принято прибегнуть к адаптивному регулятору с нечеткой логикой (РНЛ), поскольку его применение в сложных системах управления с регулировкой по времени показывает себя наиболее эффективно. Основы

применения для построения регулятора нечеткой логики были взяты из учебного пособия Г.Л. Демидова и Д.В. Лукичева [90].

На рисунке 2.17 представлена схема адаптивного регулятора. Адаптивные регуляторы данного типа применяют в системах с нелинейно изменяющимися возмущениями, а также в системах, где происходит изменение параметров с течением времени. Используемый адаптивный регулятор имеет два контура – внутренний, являющийся основным, и внешний, являющийся подстраивающимся к основному [91].

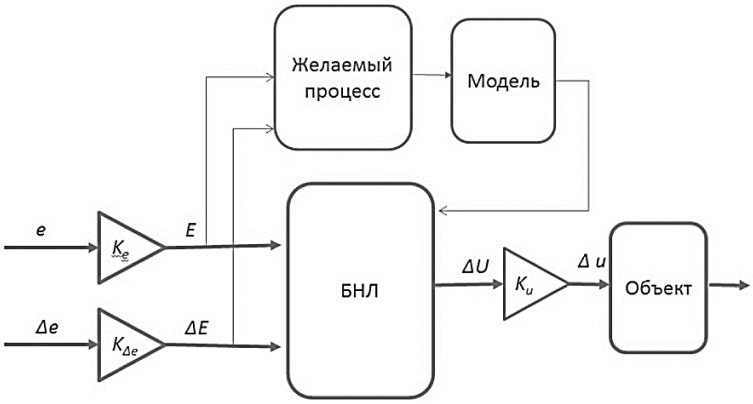


Рисунок 2.17 – Структурная схема адаптивного регулятора нечеткой логики

В блоке желаемого процесса задается ожидаемая динамика поведения транспортного средства в процессе торможения.

В блоке модель приведено лингвистическое описание в виде правил переходного процесса в системе той же размерности, что и в БНЛ.

В БНЛ (блоке нечеткой логики) реализованы процедуры фаззификации, импликации и дефаззификации.

Для реализации Блока нечеткой логики (БНЛ) было решено применить такой инструмент базы MATLAB/Simulink, как Fuzzzytoolbox. Данный инструмент позволяет создавать системы с нечетким логическим выводом, которые могут быть интегрированы в разработанные математические модели с последующей автоматической генерацией в код C/C++.

На рисунке 2.18 представлена реализация разработанного алгоритма нечеткой логики в среде MATLAB с помощью Fuzzzytoolbox [92].

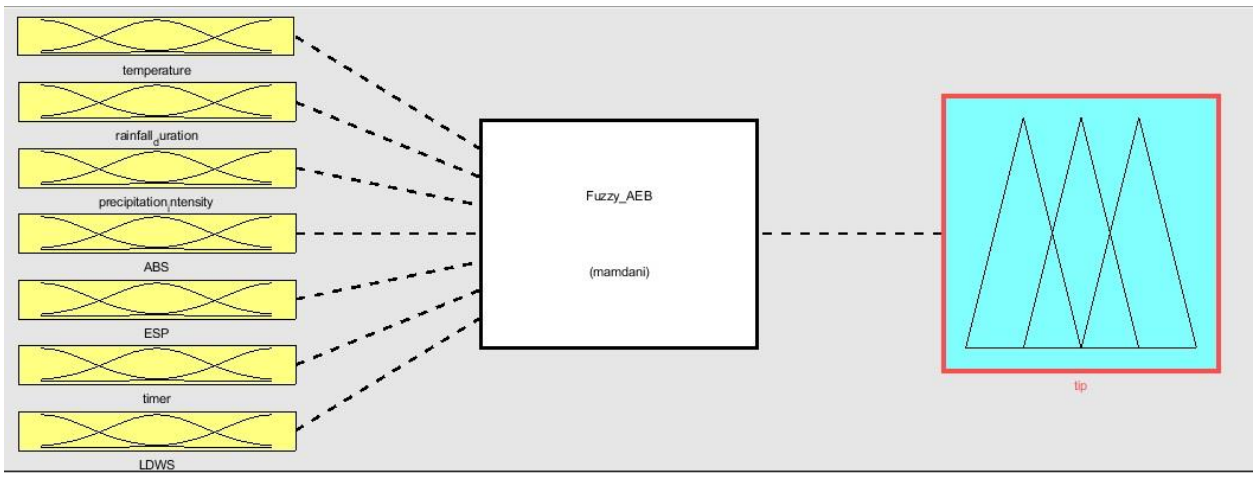


Рисунок 2.18 – Реализация нечеткой логики в Simulink

На рисунке 2.18 представлено 7 входных обрабатываемых сигналов, которые представляют собой данные для составления правил нечеткой логики. Для составления правил был взят алгоритм Мамдани [93].

Для каждого сигнала задается свой вид входных терм в соответствии с характеристикой параметра.

На рисунке 2.19 представлен вид входных параметров по температуре окружающего воздуха. Здесь выбран закон изменения терм по гауссу, поскольку он позволяет иметь гибкую регулировку в около нулевой зоне входного параметра [94].

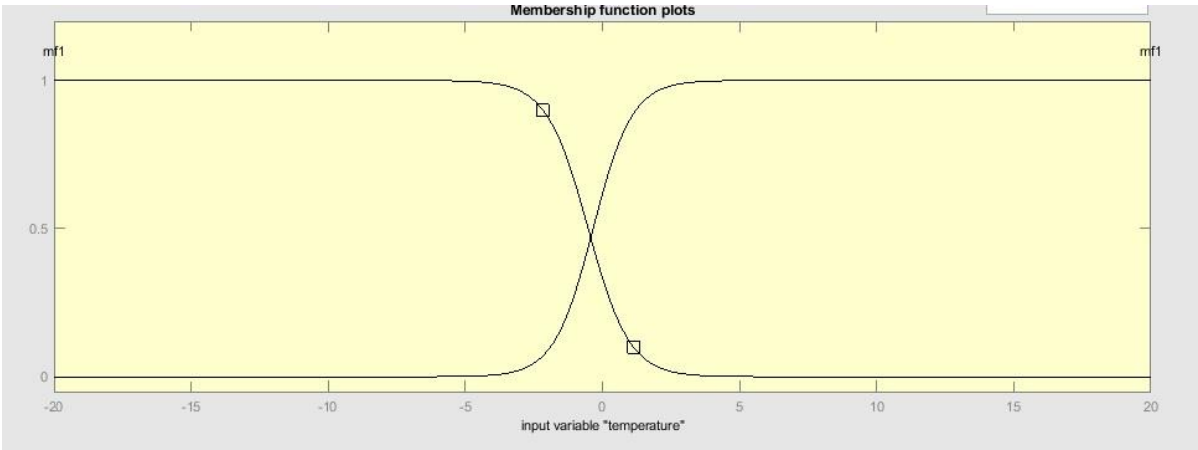


Рисунок 2.19 – Графический вид входной термы температуры

На рисунке 2.20 представлен вид входных параметров интенсивности работы стеклоочистителя. В этом случае был выбран треугольный закон

изменения терм, поскольку в параметрах интенсивности работы стеклоочистителя не требуется гибкость в регулировке [95].

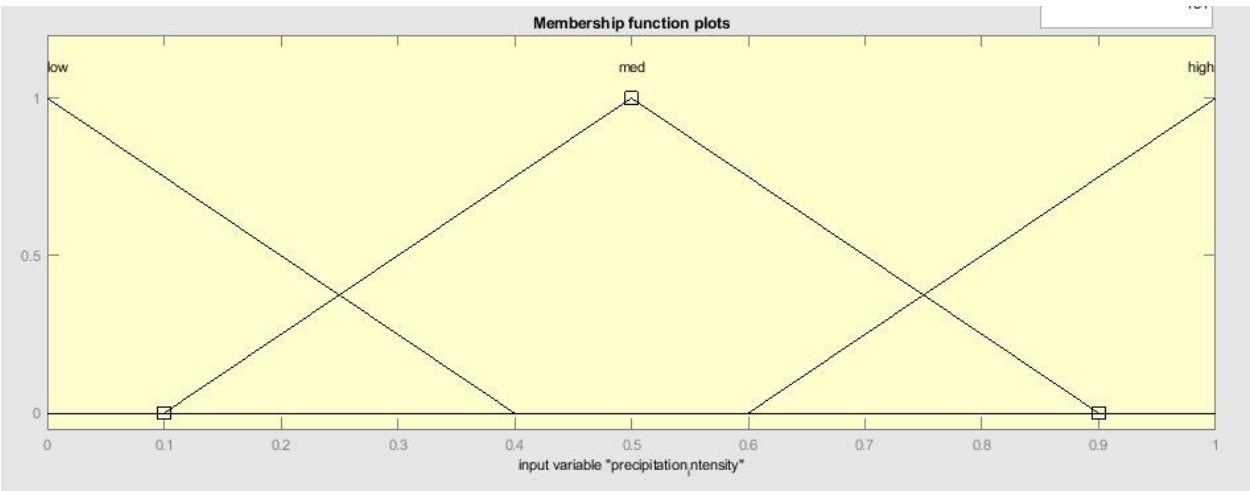


Рисунок 2.20 – Графический вид входной темы интенсивности работы стеклоочистителя

Принадлежность выходных терм от входных параметров, построенная в соответствии с таблицей 4 представлена на рисунке 2.21.

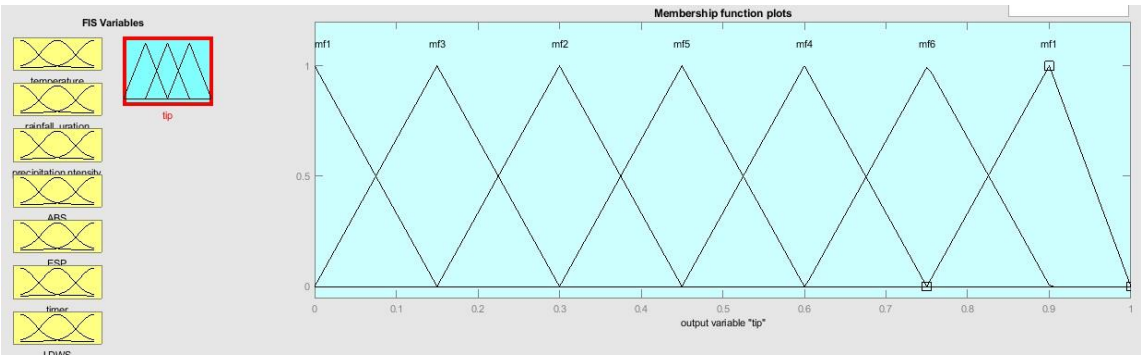


Рисунок 2.21 – Выходные термы нечеткой логики

Принадлежность выходного параметра термы привязана к прогнозируемому коэффициенту сцепления. Изменение выходной принадлежности термы представлено на рисунке 2.22.

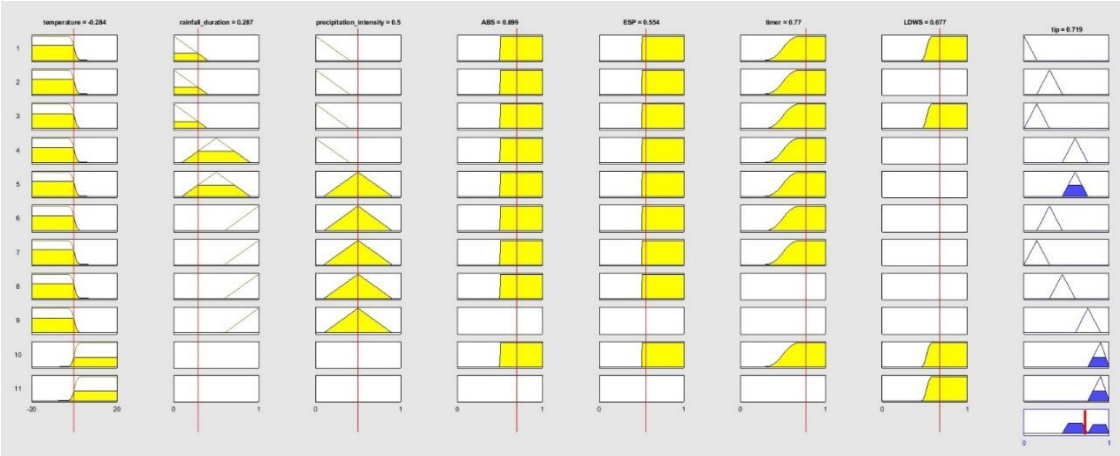


Рисунок 2.22 – Принадлежность выходных терм

На основании полученных результатов моделирования выходных параметров от входных данных по разработанным правилам нечеткой логики формируются поверхность принадлежности. Пример формируемой поверхности принадлежности в функции от скорости и интенсивности осадков представлен на рисунке 2.23.

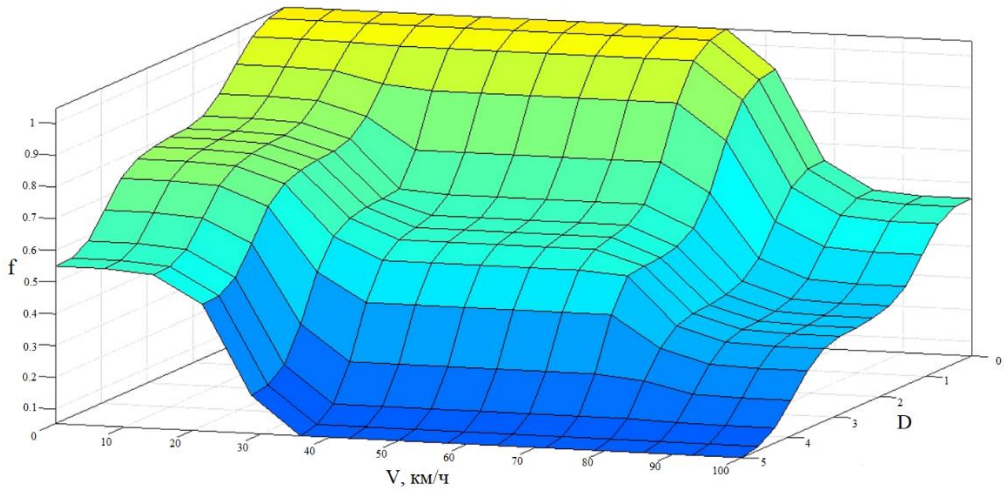


Рисунок 2.23 – Поверхность, полученная в результате моделирования алгоритма нечеткой логики

Следует отметить, что при применении других параметров для построения поверхности принадлежности – ее форма и значения будут меняться.

2.6 Синтез адаптивного алгоритма системы автоматического экстренного торможения

Расчет остановочного пути САЭТ в стандартном виде имеет следующий вид:

$$S_{общ} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4, \quad (18)$$

где

S_1 – путь, проходимый за время реакции водителя;

S_2 – путь, проходимый за время срабатывания тормозного привода;

S_3 – путь, проходимый за время достижения установившегося замедления;

S_4 – путь, проходимый за время установившегося замедления;

$S_о = \frac{v^2}{2\varphi g} + v(t_р + t_{пр} + t_н)$ – остановочный путь автомобиля;

$S_т = \frac{v^2}{2\varphi g} + v(t_н + t_{пр})$ – тормозной путь автомобиля;

$v_{отн}$ – относительная скорость;

v – текущая скорость ТС;

$t_{пр}$ – время срабатывания тормозного привода;

$t_н$ – время достижения установившегося замедления;

$t_р$ – время реакции водителя;

φ – прогнозируемый коэффициент сцепления;

g – ускорение свободного падения. [82]

Переменная $t_{пр}$, участвующая в расчете тормозного пути, имеет различные значения для каждого типа тормозной системы Соответственно, для повышения эффективности расчета тормозного пути она должна корректироваться в зависимости от типа установленной тормозной системы и ее показателей эффективности [83]. Для этого был введен поправочный коэффициент поправки на время работы тормозного привода $k_{ср}$ и предложено использование следующей зависимости от коэффициента эффективности тормозной системы для его определения:

$$k_{\text{ср}} = f(K_{\text{э}}) \tag{19}$$

Усовершенствованные тормозные системы имеют функции предварительного подвода колодок к тормозным дискам, функцию просушки тормозов и прочие системы, что повышает эффективность и снижает временную задержку от подачи сигнала запроса торможения до начала реального замедления.

Еще одной переменной, влияющей на эффективность работы САЭТ является $t_{\text{н}}$ – время достижения установившегося замедления. Наибольшее влияние на него оказывает максимально возможное значение коэффициента сцепления φ в текущих условиях движения. Для этого был введен $k_{\text{н}}$ - коэффициент поправки на время достижения установившегося замедления, который зависит от коэффициента сцепления и представлен следующей функцией:

$$k_{\text{н}} = f(\varphi) \tag{20}$$

Для прогнозирования характеристики достижения установившегося замедления в режиме автоматического экстренного торможения в процесс моделирования была введена упрощённая модель тормозной системы. Ее вид представлен на рисунке 2.24. Модель дополнена входным параметром прогнозируемого значение текущего коэффициента сцепления φ и рассчитывает характер достижения необходимого давления в тормозной системе для достижения установившегося замедления. Уравнение для расчета представлено в следующем виде:

P_i – сумму тормозных сил;

$G\varphi$ – тормозную силу автомобиля.

$$P_t = \frac{\sum P_i}{G\varphi}, \tag{21}$$

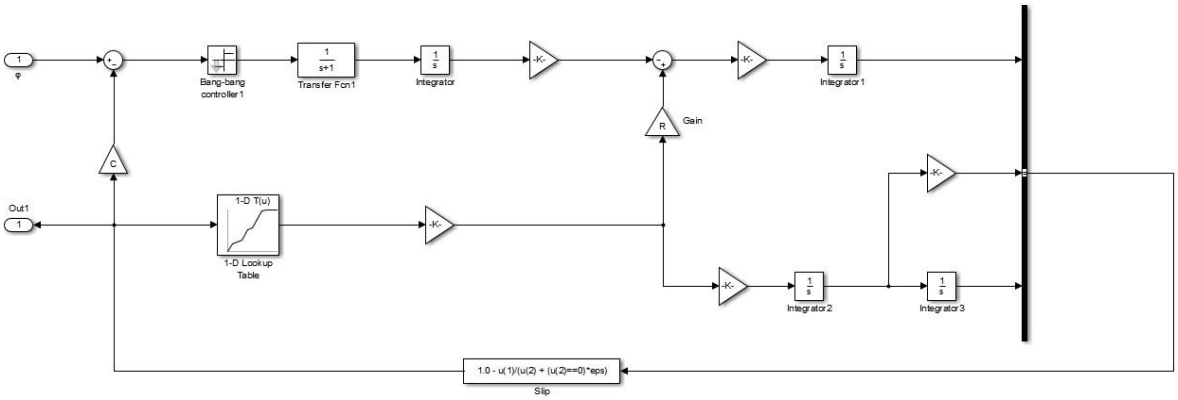


Рисунок 2.24 – Вид математической модели упрощенной гидравлической системы торможения в Simulink

Формулу остановочного пути часто используют в пересчете на временные интервалы. Переход на расчеты по временным интервалам происходит по причине того, что при рассмотрении функционирования системы за основные параметры оценки берутся значения, исчисляемые в секундах.

Следовательно, если учесть все этапы работы системы, то формулу расчета можно представить в следующем виде:

$$t_{\text{общ}} = t_{\text{пред}} + t_{\text{о}} = t_{\text{пред}} + t_{\text{н}} + t_{\text{пр}} + \frac{K_{\text{э}} V_{\text{ср}}^2}{2\varphi g}, \quad (22)$$

где

$t_{\text{пред}}$ – время, необходимое для предупреждения водителя

Величина времени, необходимого для реакции водителя в экстренной ситуации определяется из его возраста, квалификации, самочувствия и т.д. Усредненные значения данного параметра находятся в диапазоне от 0,6 до 1,8 секунды, но по результатам проведенных экспериментов с участием водителей различных возрастов и квалификации стало очевидно, что текущие значения могут быть эффективны в предупреждении для одного водителя, но иметь избыточно раннее или позднее срабатывание системы для другого [84]. Слишком позднее срабатывание системы предупреждения снижает

эффективность работы системы, не позволяя водителю предпринимать заблаговременные меры предотвращения экстренной ситуации, а слишком раннее срабатывание системы предупреждения может иметь ложные предупреждения, что провоцирует водителя к отключению работы САЭТ. Для решения этой проблемы был сделан алгоритм адаптации времени предупреждения водителя в зависимости от его стиля езды. Алгоритм является корректирующим расчетным звеном времени, необходимого для предупреждения водителя.

В работе системы автоматического экстренного торможения важную роль играет тормозная система. В зависимости от ее модификации она может быть дополнена такими подсистемами, как предварительное увеличение давления в тормозной системе, предварительная просушка тормозов для уменьшения времени достижения максимального замедления.

Также в работе САЭТ играет роль и тип тормозной системы, от которой зависит коэффициент эффективности.

В связи с вышеизложенным было предложено введение новых коэффициентов в формулу расчета тормозного пути:

φ – прогнозируемое значение коэффициента сцепления;

$k_{\text{н}}$ – коэффициент поправки на время достижения установившегося замедления;

$k_{\text{ср}}$ – коэффициент поправки на время работы тормозного привода;

В итоговом виде уравнение для математической модели, рассчитывающее критическую дистанцию для автоматической активации тормоза, в которой учтены предложенные корректирующие и прогнозируемые коэффициенты принимает следующий вид:

$$\mathrm{S_о} = \mathrm{V_{ср}} * (\mathrm{t_з} + \mathrm{t_{пр}} * k_{\text{ср}} + \frac{1}{2}\mathrm{t_н} * k_{\text{н}}) + \frac{\mathrm{K_э V_{ср}^2}}{2\varphi \mathrm{g}} \qquad (23)$$

В формуле 23 присутствуют переменные, влияющие на работу системы, которые рассчитываются в разработанном алгоритме, а также учитываются

корректирующие коэффициенты, значения которых выбираются исходя из конструктивных особенностей автомобиля.

2.7 **Блок-схема разработанного алгоритма функционирования САЭТ**

Одним из результатов работ по синтезу функционирования САЭТ для регионов со сложными дорожно-климатическими условиями является дополненный алгоритм функционирования.

Упрощенная блок-схема предложенного алгоритма функционирования САЭТ представлена на рисунке 2.25.

Рисунок 2.25 – Упрощенная блок-схема разработанного алгоритма работы САЭТ

В данной блок схеме отражены основные этапы работы алгоритма:

– опрос датчиковой аппаратуры;
– расчет текущих параметров прогнозирования $t_н$, φ;

– расчет критической дистанции, необходимой для предупреждения об опасности столкновения $S_{\text{пред}}$;

– расчет критической дистанции, для начал торможения $S_{\text{т}}^{'}$;

– сравнение текущей дистанции и критической.

2.8 **Блок-схема разработанного алгоритма корректировки времени предупреждения об опасности столкновения**

В процессе проведения испытаний разработанного алгоритма функционирования САЭТ на дорогах общего пользования водителями - испытателями ФГУП «НАМИ», поступали замечания и предложения по поводу функционирования САЭТ. В зависимости от манеры езды у водителей со спокойным стилем вождения заблаговременное предупреждение об опасности столкновения вызывало положительные отзывы, и наоборот водители с агрессивным стилем вождения считали заблаговременное предупреждение об опасности столкновения слишком ранним и раздражающим фактором, что приводило к отключению работы системы пользователем. В свою очередь отключение системы не позволит избежать ДТП в случае действительного возникновения экстренной ситуации. Для решения данной проблемы был разработан алгоритм контроля стиля вождения, позволяющий корректировать временной запас на предупреждение о возможном столкновении.

Упрощенная блок-схема функционирования алгоритма корректировки времени предупреждения представлена на рисунке 2.26.

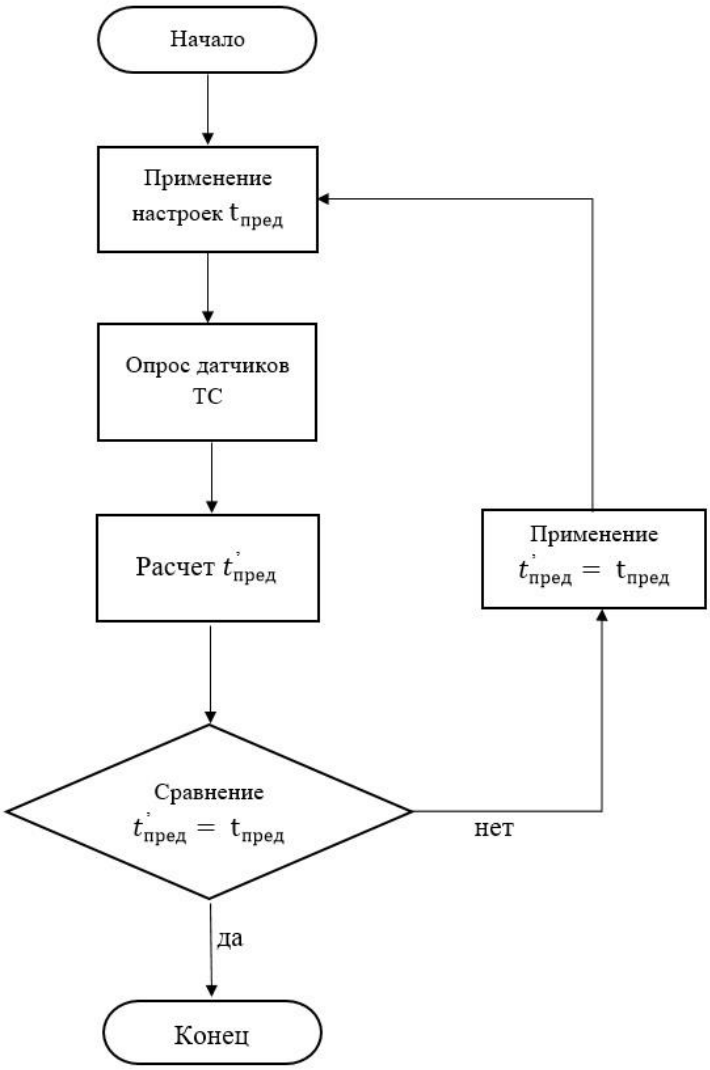


Рисунок 2.26 – Упрощенная блок-схема разработанного алгоритма контроля стиля вождения

В данной блок схеме отражены основные этапы работы алгоритма:

– опрос датчиковой аппаратуры (продольные и поперечные ускорения автомобиля, скорость вращения рулевого колеса, активность воздействия на педаль акселератора;

– расчет текущих параметров времени для предупреждение водителя об опасности столкновения $t_{пред}$;

– расчет уточненного времени для предупреждение водителя об опасности столкновения дистанции $t'_{пред}$.

2.9 **Выводы по главе 2**

1. Выбраны и обоснованы основные допущения и ограничения построения математической модели, позволяющие с достаточной для поставленной цели точностью математически описать движение автомобиля, оснащенного адаптивной системой автоматического экстренного торможения.

2. Разработана уточненная математическая модель функционирования системы автоматического экстренного торможения, учитывающая сценарии поведения автомобиля-лидера, функционирование сенсорно-аппаратной части, конфигурацию систем активной безопасности автомобиля.

3. Описана и реализована модель имитации различных дорожных сценариев для виртуальной калибровки алгоритма, основанная на собранной статистике поведения водителей на дорогах общего пользования. Установлено, что в наиболее репрезентативных условиях движения диапазоны замедления автомобиля-лидера составляют от - 1 до - 4 м/с^2. Данные значения применены к виртуальным калибровкам САЭТ для максимального приближения имитационного моделирования к действительному.

4. Разработано построение общей математической модели расчета тормозного пути системы автоматического экстренного торможения с учетом корректирующих коэффициентов, значения которых рассчитываются исходя из конструктивных особенностей автомобиля.

5. Интегрирована упрощённая модель тормозной системы, которая дополнена входным параметром прогнозируемого значения текущего коэффициента сцепления φ и рассчитывает характер достижения необходимого давления в тормозной системе для достижения установившегося замедления.

6. Получен уточненный алгоритм функционирования САЭТ и алгоритм корректировки времени предупреждения водителя о столкновении. Результаты представлены в виде упрощенных блок-схем алгоритмов функционирования системы.

3 Методика и результаты экспериментального исследования

3.1 **Цели и задачи экспериментального исследования**

Результаты, полученные при теоретическом исследовании с помощью математического моделирования, требуют экспериментального подтверждения. Это связано с тем, что математическая модель имеет определенные ограничения и допущения относительно реальных физических процессов. Соответственно, для оценки соответствия математической модели реальным значениям протекающего процесса необходимо экспериментальное исследование. Сравнение полученных результатов экспериментального исследования САЭТ с результатами, полученными при моделировании, позволит провести качественную оценку достоверности полученных результатов.

В соответствии с этими целями экспериментальное исследование проводилось по следующим этапам:

– испытания на соответствие расчётного времени работы тормозного привода действительному ($t_{\text{пр}}$);

– испытания на проверку соответствия действительного коэффициента сцепления $\varphi_{\text{д}}$ с дорожным полотном спрогнозированному значению $\varphi_{\text{р}}$;

– испытания на соответствие прогнозируемого времени достижения установившегося замедления действительному ($t_{\text{н}}$);

– испытания на соответствие расчетного тормозного пути математической модели и тормозного пути, полученного экспериментально.

В качестве показателей, характеризующих эффективность работы алгоритма прогнозирования коэффициента сцепления, позволяющих провести объективную сравнительную оценку были выбраны следующие:

$V_{\text{сраб}}$ – скорость, на которой была активация торможения;

$j_{\text{уст}}$ – установившееся значение замедления;

$\varphi_р$ – прогнозируемый коэффициент сцепления шины с опорной поверхностью;

$\varphi_д$ – действительный коэффициент сцепления шины с опорной поверхностью;

Так как основная формула установившегося замедления имеет вид:

$$j_{уст} = \varphi * g\ , \tag{24}$$

то

$$j_{уст}/g = \varphi_д\ , \tag{25}$$

$\varphi_р$ – рассчитывается посредством алгоритма прогнозирования.

Предложенные параметры должны в полной мере отображать основные показатели работы системы. Основным параметром для проверки прогнозирования коэффициента сцепления будет являться сравнение расчетного и полученного при проведении испытания коэффициента сцепления ($\varphi_р$ и $\varphi_д$).

В качестве показателя эффективности синтезированного алгоритма функционирования САЭТ было взято соответствие прогнозируемого тормозного пути к действительному в различных внешних условиях, учитывая динамически изменяющиеся внешние факторы.

3.2 **Объект исследования**

Объектом исследования являлся один из рабочих прототипов проекта ЕМП ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», представленный на рисунке 3.1. Прототип оснащен гидравлическим тормозным приводом с предустановленным аппаратным набором САЭТ.

Рисунок 3.1 – Внешний вид объекта испытаний

Характеристики испытуемого образца представлены в таблице 5

Таблица 5 – Характеристики испытуемого образца

Тип кузова	седан Senat (небронированный)
Двигатель	V8
Объем, л	4,4
Мощность, л.с.	598
Привод	AWD (полный)
Трансмиссия	9 ст. АКПП
Максимальная скорость, км/час	250
Длина, мм	5630
Ширина, мм	2020
Высота, мм	1685

Колесная база, мм	3300
Клиренс, мм	200
Вес, кг	2740
Шины	255/55 20″

На испытуемый автомобиль был установлен полный набор системы автоматического экстренного торможения: фронтальная камера распознавания объектов, фронтальный радар, блок управления интеллектуальной помощи водителю, проверена работа штатных датчиков автомобиля (датчик дождя, интенсивности работы стеклоочистителя, температуры, датчик определения заноса, антиблокировочной системы тормозов).

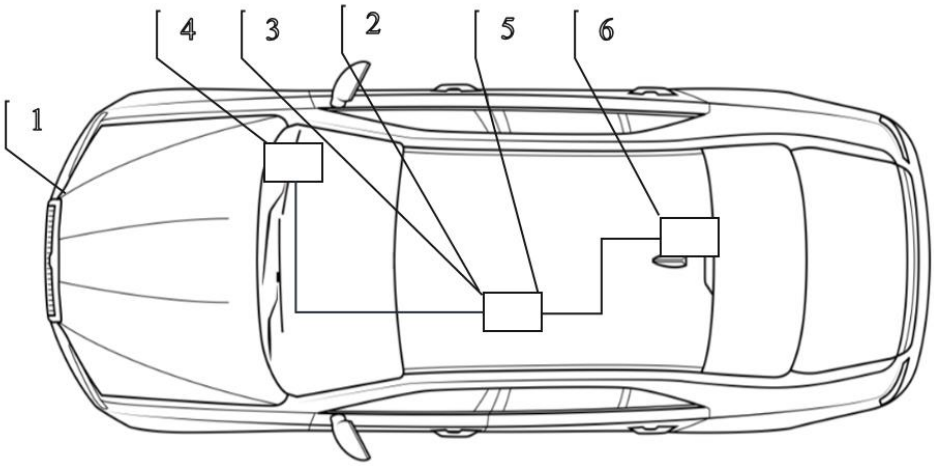


Рисунок 3.2 – Схематичное расположение установленных компонентов 1 – фронтальный радар, 2 – фронтальная камера распознавания объектов, 3 – датчик дождя, 4 – блок управления тормозной системой, 5 -блок управления САЭТ, 6 – датчики продольных и поперечных ускорений ESP.

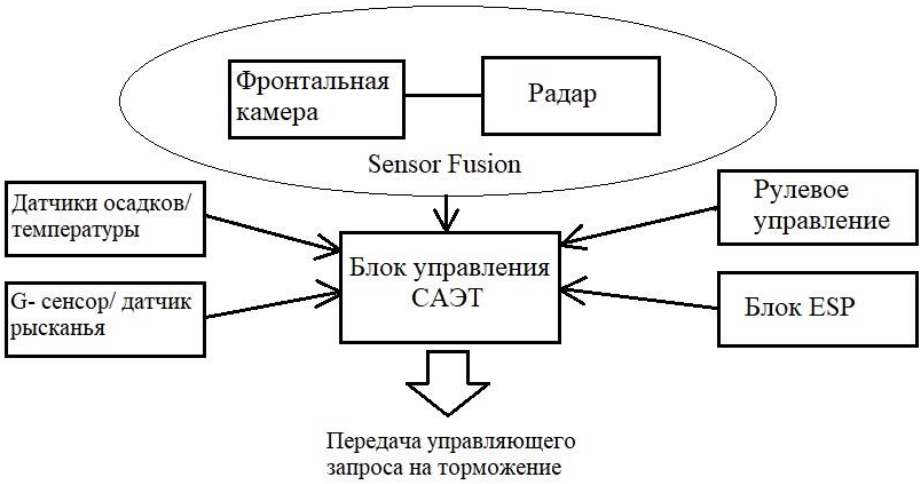


Рисунок 3.3 – Схематичное представление состава САЭТ

3.3 **Измерительное и записывающее оборудование**

Поскольку основными параметрами, требующимися для анализа, являются скорость и ускорение автомобиля, то одним из наиболее часто используемых аппаратов для записи данных подобного формата является VBOX racelogic, представленный на рисунке 3.4. Данное устройств имеет возможность подключения к шине CAN и имеет GPS-соединение с частотой обновления до 100Гц.

Рисунок 3.4 – Внешний вид Racelogic

На испытуемом автомобиле установлена система ESP, которая имеет широкий набор параметров: частота вращения каждого колеса, продольные и боковые ускорения, скорость ТС и т.д. Т.к. на испытуемом автомобиле имеется возможность подключения к блокам управления, а также доступ к параметрам ESP, то есть возможность использовать в испытаниях те данные,

которые будет считывать блок управления. Для уточнения актуальности параметров были сделаны пробные испытания и записаны данные двумя способами.

Для подключения к CAN-шине автомобиля использовался адаптер Vector VN 1630, представленный на рисунке 3.5 и ноутбук.

Рисунок 3.5 – Внешний вид VN 1630

Для сравнения точности записываемых данных и выбора аппарата для записи были проведены торможения на сухом ровном асфальте с 80 км/ч. Основным критерием для оценки было выбрано значение замедления. На рисунках 3.6 и 3.7 представлены графики записанных данных. Как видно на верхнем графике рисунка 3.6, значение замедления с VBOX racelogic имеет шум значения около 0,2 м/с^2. На рисунке 3.6 представлен график замедления, записанный с блока ESP при помощи Vector VN 1630. Шум значения замедления также находится на уровне 0,2 м/с^2.

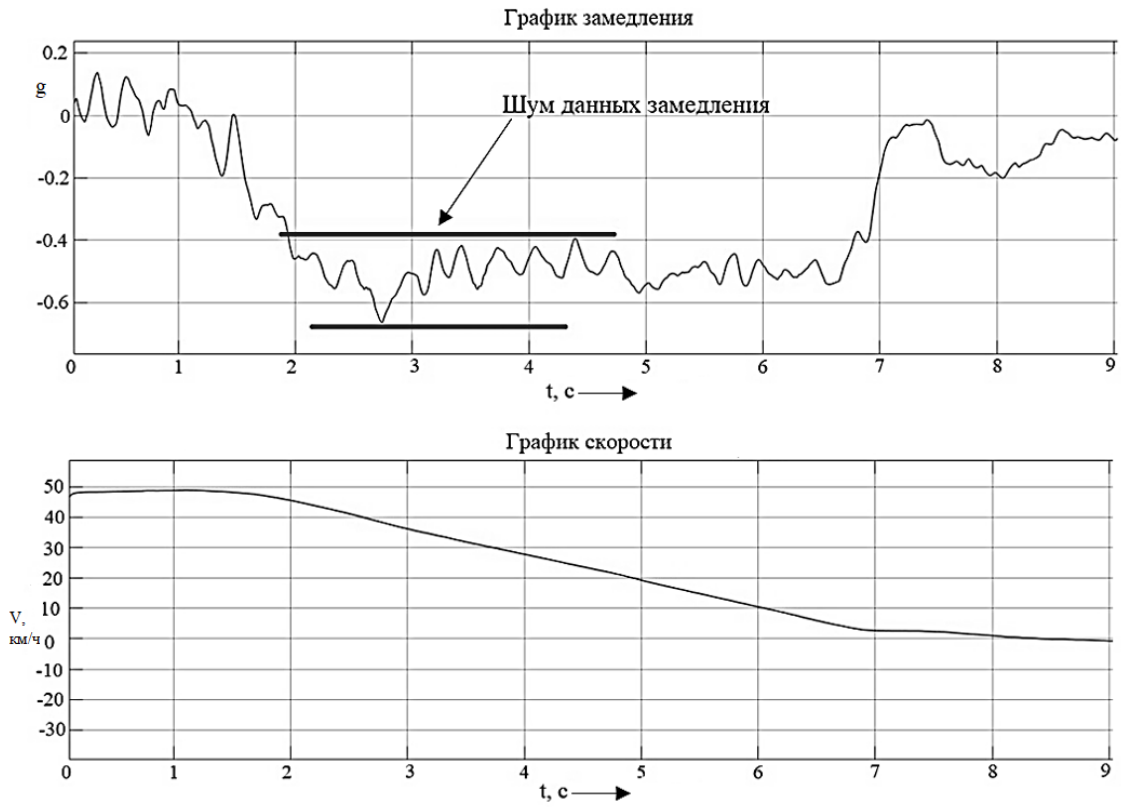


Рисунок 3.6 – Фрагмент записанных данных с помощью Racelogic

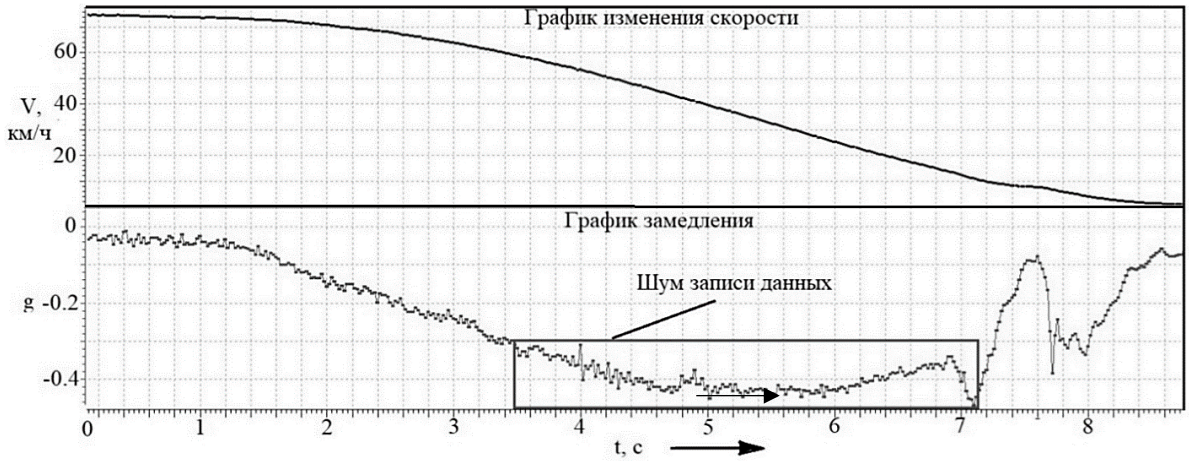


Рисунок 3.7 – Фрагмент записанных данных с помощью VN 1630

Исходя из проведенных испытаний записывающего оборудования было получено, что запись значений с блока ESP имеет достаточную точность для проведения необходимых испытаний. Исходя из этого было использовано следующее оборудование:

Записывающее оборудование – Vector VN 1630, ноутбук.

Программа обработки записанных данных – Canalyzer v 9.0. Внешний вид рабочего окна программы представлен на рисунке 3.8.

Регистрируемые параметры:

– скорость автомобиля;
– ускорение автомобиля;
– давление в тормозном контуре;
– запрос торможения.

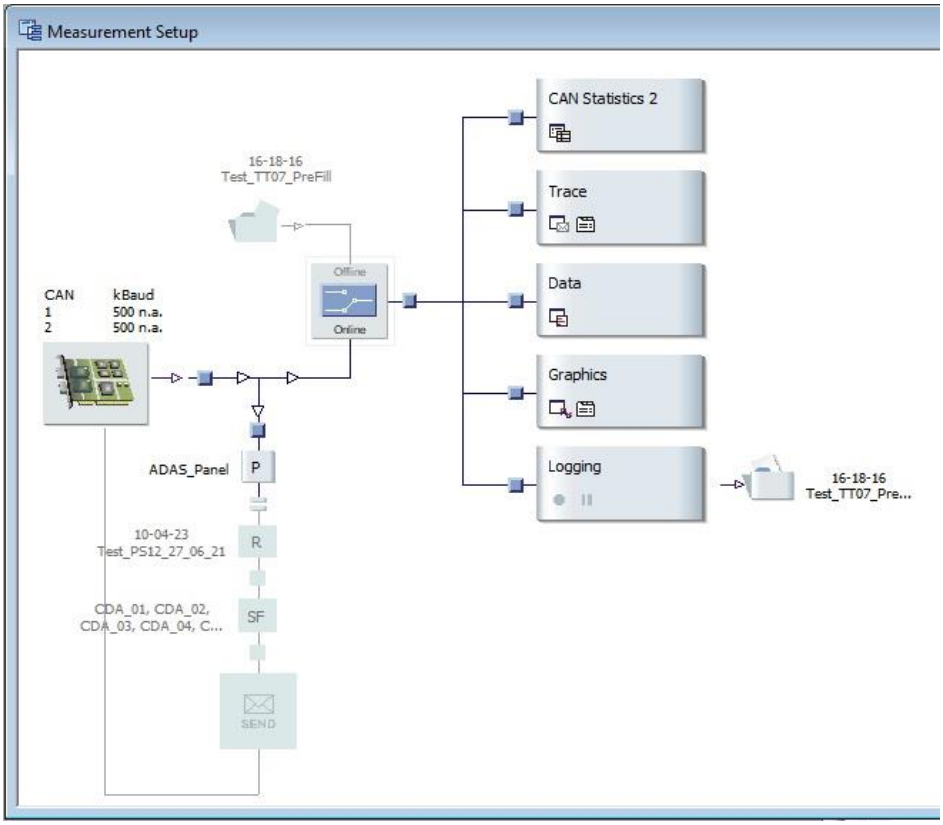


Рисунок 3.8 – Внешний вид основного экрана программы Canalyzer

3.4 **Методика проведения испытаний**

В испытания по оценке эффективности работы разработанного алгоритма САЭТ было включено четыре этапа.

На первом этапе было определено соответствие коэффициентов, зависящих от конструктивных особенностей исследуемой тормозной системы.

Вторым этапом проведено испытание на соответствие прогнозируемого коэффициента сцепления с опорной поверхностью и действительного.

Внешние экспериментальные условия для испытаний выбирались таким образом, чтобы быть максимально приближенными к повседневным условиям эксплуатации, и включали в себя:

- участок дороги с сухим асфальтом;
- участок дороги с мокрым асфальтом;
- участок дороги с укатанным снегом.

Третьим этапом проводилось испытание работы САЭТ с учетом всех корректирующих коэффициентов в испытаниях на столкновения с мягкой мишенью.

Четвертым этапом проводилось испытание работы САЭТ на дорогах общего пользования в различных условиях, в том числе и в сложных дорожно-климатических условиях крайнего севера для оценки эффективности и надежности работы в условиях повседневной эксплуатации.

В качестве основы алгоритма использовалась формула расчета тормозного пути, полученная во 2 главе, которая имеет вид:

$$S_о = V_{ср} * (t_з + t_{пред} + t_{пр} * k_{ср} + \frac{1}{2} t_н * k_н) + \frac{K_э V_{ср}^2}{2\varphi g} \quad (26)$$

В представленном расчете присутствуют переменные и параметры, зависящие от конструктивных особенностей, спрогнозированные значения коэффициента сцепления и адаптивное время предупреждения водителя о столкновении.

3.5 **Определение минимального количества повторных опытов**

Чтобы определить минимально необходимое количество тестовых заездов, был проведен предварительный эксперимент. В ходе эксперимента были проведены тестовые испытания, в ходе которых была произведена запись 7 регистрируемых параметров. По результатам предварительных замеров было получено минимальное количество испытательных заездов, позволяющее проводить экспериментальные измерения с доверительной вероятностью не менее $P_д = 0{,}97$.

Расчет среднеквадратичного отклонения:

$$D = \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - (\overline{y}))^2}{n-1}, \quad (27)$$

где

$\bar{y}$ - среднеарифметическое значение параметра в данный момент времени:

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i, \quad (28)$$

где y_i - значение параметра в i-ом замере;

n - число пробных опытов.

Количество повторных опытов определяем по формуле:

$$n_{min} = \frac{\sigma(\bar{x})a_{ст}}{\bar{y}\Delta}, \quad (29)$$

где

$a_{ст}$ - коэффициент Стьюдента, при доверительной вероятности,

$P_д$ = 0,97 , n = 3, $a_{ст}$= 2,57.

Для обеспечения заданной точности эксперимента принимаем n_{min} = 3.

3.6 **Испытания на проверку соответствия прогнозирования эффективности работы САЭТ в зависимости от установленной конфигурации систем активной безопасности**

В зависимости от конструктивных особенностей транспортных средств в них применяют различные тормозные механизмы [94]. Основные разновидности представлены на рисунке 3.9.

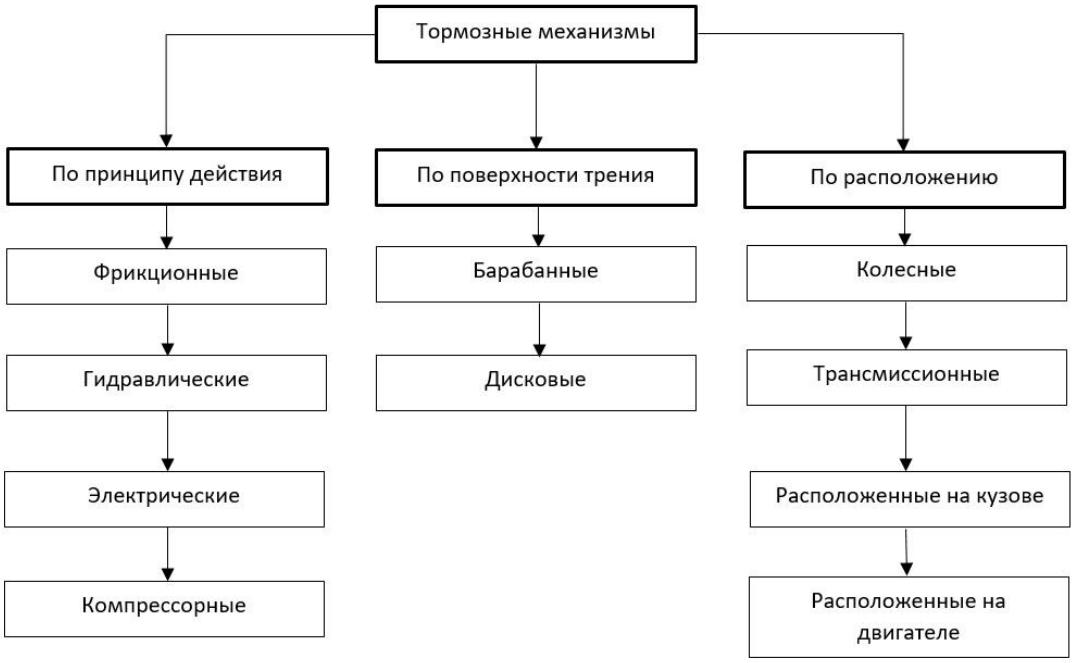


Рисунок 3.9 – Типы наиболее распространенных тормозных механизмов

Наиболее распространенным типом тормозных механизмов является гидравлическая система с дисковой поверхностью трения, расположенные на колесе ТС.

Определение зависимости $t_{\text{пр}}$ от типа тормозной системы

Время срабатывания тормозной системы с гидравлическим приводом и дисковыми тормозами может колебаться от 0,2 до 0,4 секунды, в зависимости от состояния гидравлической магистрали, состояния тормозной жидкости системы, производительности установленного гидроблока. В среднем данное значение на исправной тормозной системе принимается за 0,2…0,3 секунды [96].

В существующих формулах для определения времени торможения и тормозного пути автомобиля не учтен ряд конструктивных и эксплуатационных факторов, существенно влияющих на эффективность торможения. Поэтому в действительности значения времени и пути торможения могут быть до 30 % больше рассчитанных по этим формулам.

Для согласования результатов теоретических расчетов с эксплуатационными данными служит коэффициент эффективности

торможения $K_э$ [97]. Он учитывает непропорциональность тормозных сил на колесах нагрузкам, приходящимся на колеса, а также износ, регулировку, замасливание и загрязненность тормозных механизмов. Данный коэффициент показывает, во сколько раз действительное замедление автомобиля меньше теоретического, максимально возможного на данном дорожном покрытии.

Поскольку параметр $t_{пр}$ зависит от конструктивных особенностей конкретной тормозной системы, для расчетов времени запаздывания работы тормозного привода будет справедлива зависимость, представленная формулой 32.

$$t_{пр} = f(K_э) \tag{30}$$

$K_э$ = 1…1,2 - для легковых автомобилей с гидравлической тормозной системой.

$K_э$ = 1,3…1,5 - для грузовых автомобилей и автобусов с пневматической тормозной системой.

Тормозные системы с гидравлическим приводом и дисковыми тормозами также могут отличаться своей конфигурацией [98]. Для повышения эффективности работы систем экстренного торможения и сокращения задержки $t_{пр}$ производители тормозных систем используют так называемое «предзаполнение» в тормозной системе. Оно представляет собой установку небольшого давления в тормозной магистрали при возникновении вероятности необходимости активации торможения системой САЭТ, что позволяет подвести колодки к тормозному диску, но при этом замедления еще не происходит [99]. Благодаря предварительному повышению давления в тормозной системе достигается сразу несколько положительных моментов:

– значение давления, которое соответствует началу замедления ТС достигается за короткое время;

– происходит подведение колодок к тормозному диску;

– происходит снятие водного слоя с поверхности тормозного диска, если оно присутствовало.

В качестве экспериментального исследования было проведено испытание работы системы автоматического экстренного торможения на легковом автомобиле с гидравлической тормозной системой и дисковыми тормозами. В качестве объекта испытаний использовался один из прототипов проекта ЕМП ФГУП «НАМИ». Тормозная система испытуемого автомобиля предусматривает возможность работы системы автоматического экстренного торможения как с предварительным повышением давления в тормозной системе, так и по стандартному алгоритму – без предварительного повышения давления.

В ходе эксперимента было проведено три тестовых торможения стандартной работы системы и три тестовых торможения по алгоритму с предварительным заполнением. Данные записаны с помощью подключения к CAN-шине автомобиля через адаптер Vector VN 1630 и ноутбук.

Регистрировались следующие параметры:

– подача запроса замедления к тормозной системе автомобиля;
– значение давления в гидравлической системе тормозов;
– значение замедления автомобиля.

Результат проведенного эксперимента представлен на рисунке 3.10.

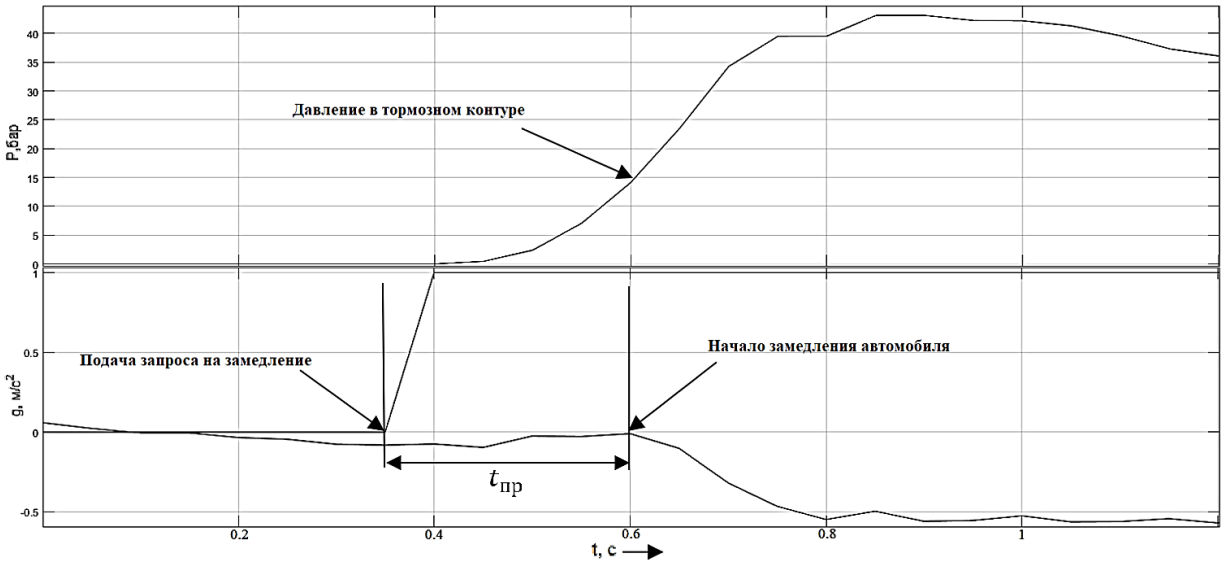


Рисунок 3.10 – Испытание без предварительного увеличения давления в тормозной системе

Из результатов проведения данного эксперимента были получены значения $t_{пр}$, представленные в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты экспериментального исследования

№	1	2	3
$t_{пр}$, с	0,21	0,22	0,22

Следующим этапом проведения эксперимента было проведение испытания с предварительным увеличением давления в гидравлическом контуре тормозной системы. Графики проведения данного испытания представлены на рисунке 3.11. На рисунке отмечено время начала увеличения давления с целью предварительного заполнения, а также момент начала замедления по запросу от системы автоматического экстренного торможения.

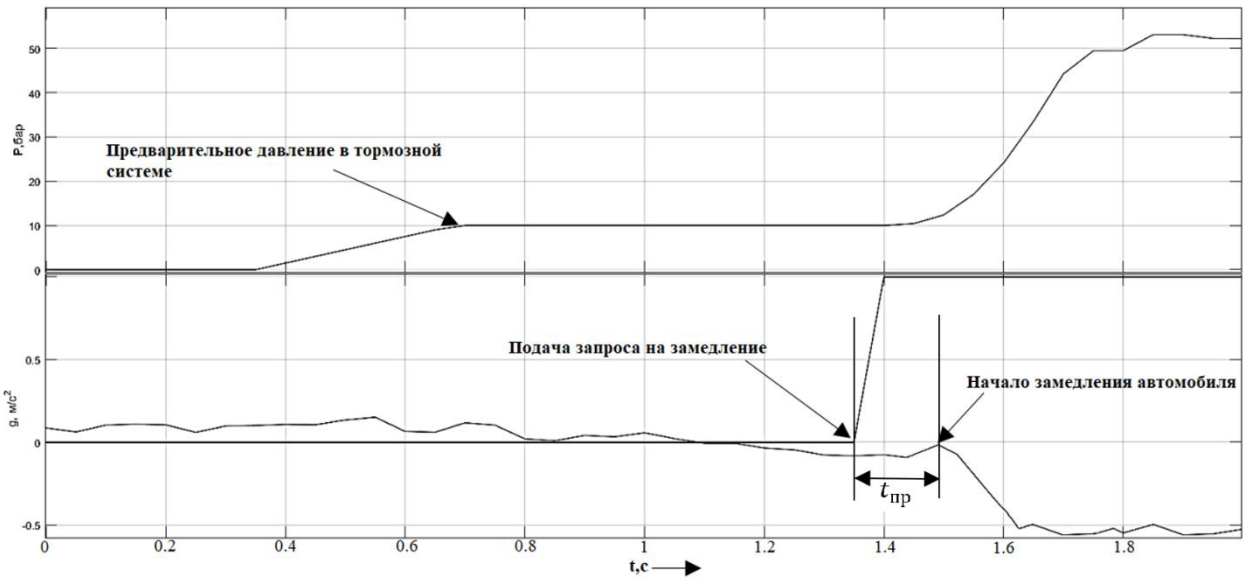


Рисунок 3.11 – Испытание с предварительным увеличением давления в контуре тормозной системы

Результаты проведенных испытаний с предварительным увеличением давления в контуре тормозной системы ТС представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты экспериментального исследования с предварительным увеличением давления

№	1	2	3
$t_{пр}$ экспериментальное, с	0,15	0,14	0,14

В результате проведенных испытаний были получены результаты сокращения времени работы тормозного привода. Значения представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результат сокращения времени до начала замедления ТС

№	1	2	3
$\Delta t_{пр}$, с	0,06	0,08	0,08
$\Delta t_{пр}$, %	27	36	36

Из результатов проведенного эксперимента следует доказательство зависимости $t_{пр}$ от коэффициента эффективности тормозной системы $K_э$, что при меньшей эффективности работы тормозной системы (увеличении $K_э$), увеличивается и $t_{пр}$. Следовательно, зависимость $t_{пр} = f(K_э)$ справедлива в применении при расчетах прогнозирования тормозного пути системы автоматического экстренного торможения.

Исходя из значений $K_э$ для грузовых автомобилей и автобусов с пневматической тормозной системой [100], прогнозируется еще большее увеличение времени $t_{пр}$ (порядка 20-30 %), относительно гидравлических систем легковых автомобилей [101]. Такой разброс параметров может серьезно сказываться на прогнозировании тормозного пути в режиме работы системы автоматического экстренного торможения. Например, при скорости движения ТС 90 км/ч увеличение параметра $t_{пр}$ на 0,2 секунды соответствует увеличению тормозного пути ТС на 5 метров. Если переменная $t_{пр}$ в расчетах алгоритма САЭТ применяется как среднее значение, не учитывающее особенности конструкции тормозного механизма, то при несвоевременном воздействии на тормозной привод возможна слишком большая погрешность в расчетах тормозного пути, что может привести к столкновению.

3.7 Испытания на проверку соответствия действительного коэффициента сцепления с дорожным полотном спрогнозированному значению

Для проверки расчетного коэффициента сцепления $\varphi_{\text{р}}$ необходимо провести испытания, из которых будет выявлен действительный коэффициент $\varphi_{\text{д}}$. В испытаниях проведено сравнение полученных данных, а также проведен анализ погрешности расчетов с действительными значениями.

Сравнение прогнозируемого коэффициента алгоритма и его корреляция с действительным экспериментальным значением имеет вид:

$$\Delta\varphi = |\varphi_{\text{р}} - \varphi_{\text{д}}| \tag{31}$$

Значение $\varphi_{\text{р}}$ в текущем эксперименте прогнозируется исходя из расчета алгоритма и математической модели, описанной во 2 главе. Сенсор продольных ускорений, участвующий в работе системы ESP, определяет текущие значения замедления при проведении испытаний. Значение полученного замедления являлось критерием оценки сходимости расчётных и экспериментальных данных.

Значение $\varphi_{\text{д}}$ с сенсора продольного ускорения ESP имеет некоторый разброс и шум. Для анализа среднего значения записанных лог-файлов испытаний был создан фильтр анализа в Simulink. На рисунке 3.12 представлена схема модели фильтра. Функция автоматически считает среднее установившееся замедление, которое выводится на блок Display.

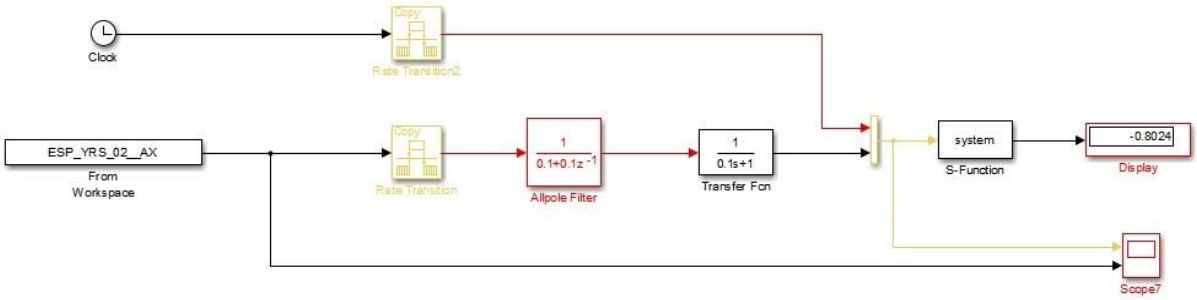


Рисунок 3.12 – Модель определения среднего значения установившегося замедления

На рисунке 3.13 представлен вид исходного сигнала (верхний график) и его вид после фильтрации (нижний график).

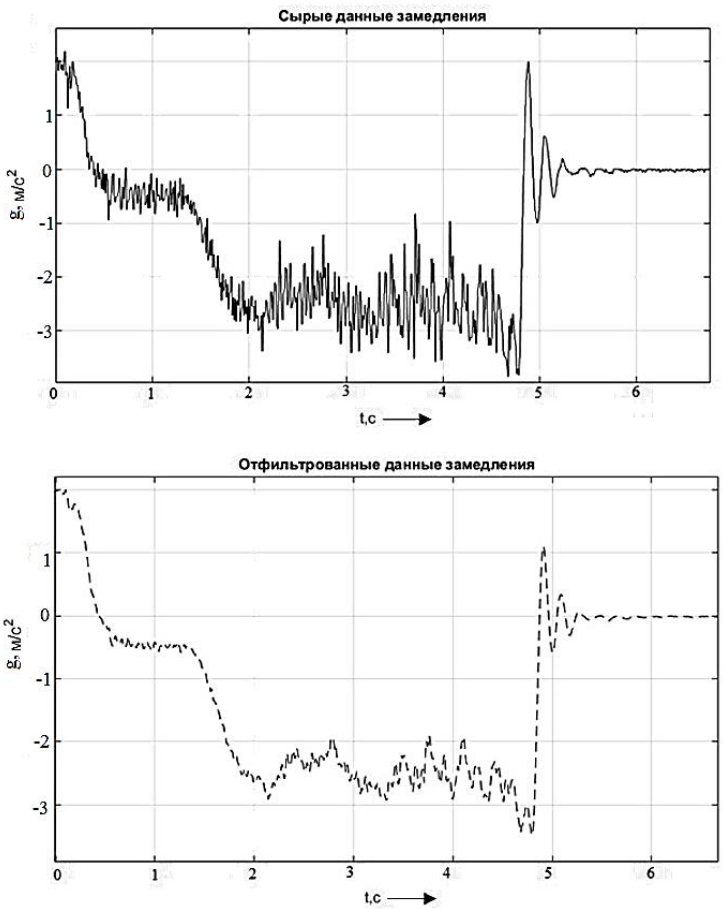


Рисунок 3.13 – Фильтрация графика замедления

3.8 **Экспериментальное исследование на сухом асфальте**

На первом этапе экспериментального исследования проведена проверка точности прогнозирования текущего коэффициента сцепления при движении на сухом асфальте. Для более точного определения коэффициента сцепления необходимо движение не менее 5 минут на испытуемом ТС по испытуемому участку с внешними условиями, в которых проводится экспериментальное исследование. За это время накопленные данные позволяют наиболее точно скорректировать коэффициенты по текущим условиям и применить значение поправочных коэффициентов.

Проведение испытаний на сухом асфальте.

Испытание на сухом асфальте на скорости 20-40 км/ч.

Погодные условия: Температура окружающего воздуха 10-15 ^{0}С, без осадков, преимущественно солнечно.

Дорожное покрытие: Сухой асфальт, без уклона.

Скорость на начало торможения: 20 км/ч, 30 км/ч, 40 км/ч.

На рисунке 3.14 представлены результаты экспериментального исследования корреляции прогнозируемого и действительного коэффициента сцепления. В процессе движения автомобиля был подан запрос на торможение от САЭТ. На графиках можно видеть прогнозируемый коэффициент сцепления, реальный достигнутый коэффициент сцепления, скорость и давление в тормозной системе на момент проведения эксперимента.

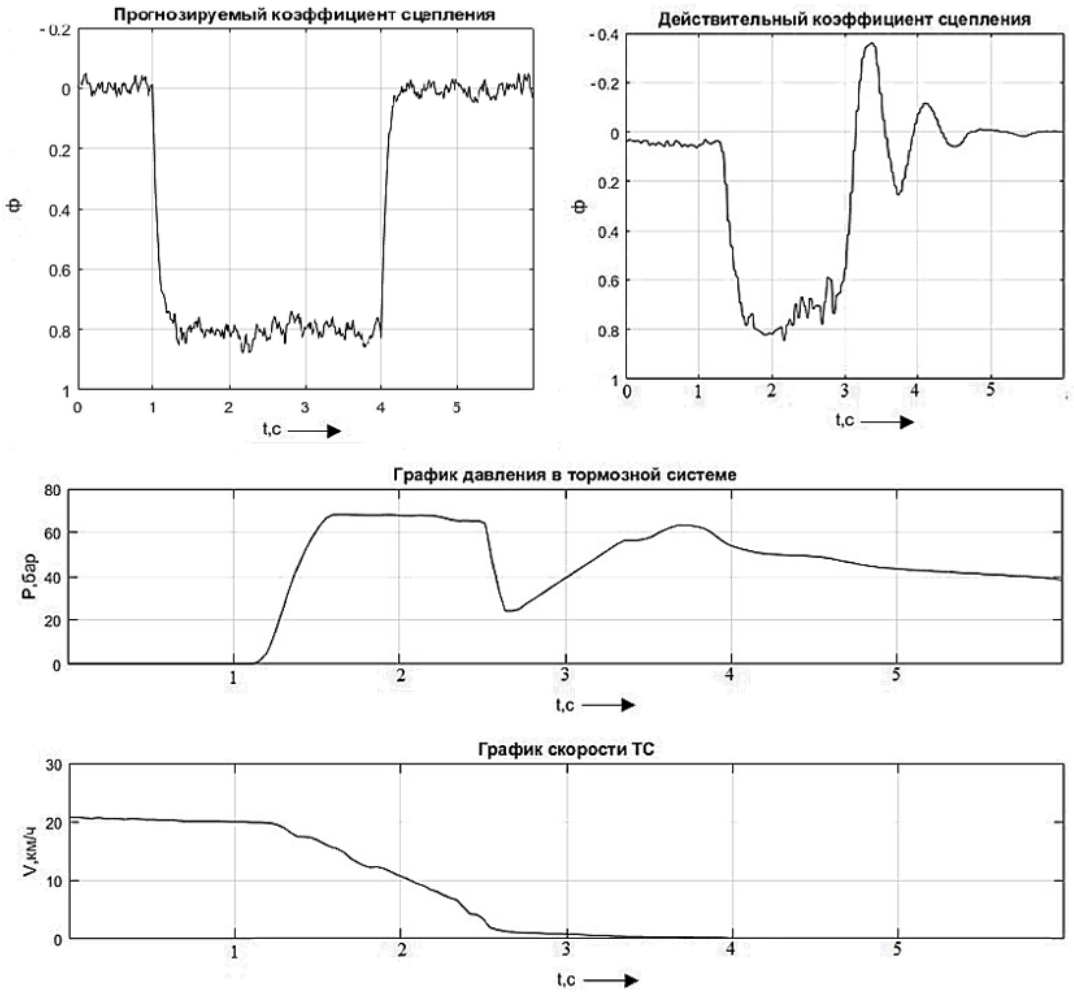


Рисунок 3.14 – Пример записи результатов проведения эксперимента на сухом асфальте на 20 км/ч

По итогам эксперимента были получены следующие результаты по трем заездам на скорости 20 км/ч:

Таблица 9 – Результаты эксперимента на 20 км/ч

V, км/ч	20	20	20
$\varphi_р$ (прогнозируемое значение)	0,81	0,81	0,8
$\varphi_д$ (экспериментальное значение)	0,78	0,82	0,76
$\Delta\varphi$ (расхождение результатов)	0,03	0,01	0,04
Погрешность, %	3,8	1,2	5,2

По результатам проведенных испытаний на скорости 20 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных 5,2 %.

Таблица 10 – Результаты эксперимента на 30 км/ч

V, км/ч	30	30	30
$\varphi_р$ (прогнозируемое значение)	0,79	0,78	0,81
$\varphi_д$ (экспериментальное значение)	0,81	0,76	0,77
$\Delta\varphi$ (расхождение результатов)	0,02	0,04	0,04
Погрешность, %	2,4	5,3	5,2

По результатам проведенных испытаний на скорости 30 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных 5,3 %.

Таблица 11 – Результаты эксперимента на 40 км/ч

V, км/ч	40	40	40
$\varphi_р$ (прогнозируемое значение)	0,78	0,79	0,78
$\varphi_д$ (экспериментальное значение)	0,78	0,81	0,8
$\Delta\varphi$ (расхождение результатов)	0	0,02	0,02
Погрешность, %	0	2,4	2,5

По результатам проведенных испытаний на скорости до 40 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных составила 2,5 %.

Испытание на сухом асфальте на скорости 50-70 км/ч.

Входные данные:

Погодные условия: Температура окружающего воздуха 10-15 ^{0}С, без осадков, преимущественно солнечно.

Дорожное покрытие: Сухой асфальт, без уклона.

Скорость на начало торможения: 50 км/ч, 60 км/ч, 70 км/ч.

На рисунке 3.15 представлены результаты экспериментального исследования корреляции прогнозируемого и действительного коэффициента сцепления на скорости 50 км/ч на сухом асфальте.

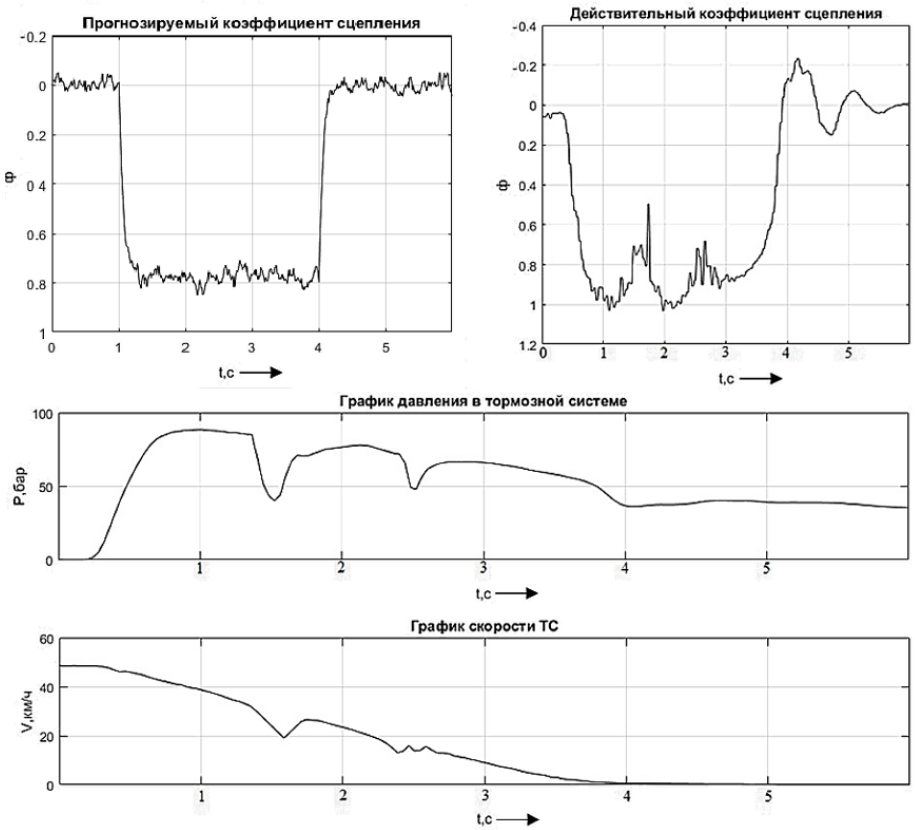


Рисунок 3.15 – Пример записи результатов проведения эксперимента на 50 км/ч

По результатам проведенного эксперимента были получены следующие результаты по трем заездам:

Таблица 12 – Результаты эксперимента на 50 км/ч

V, км/ч	50	50	50
$\varphi_р$ (прогнозируемое значение)	0,78	0,77	0,78
$\varphi_д$ (экспериментальное значение)	0,79	0,82	0,82
$\Delta\varphi$ (расхождение результатов)	0,01	0,05	0,04
Погрешность, %	1,2	6	4,8

По результатам проведенных испытаний на сухом асфальте на скорости 50 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных составила 6 %.

Таблица 13 – Результаты эксперимента на 60 км/ч

V, км/ч	60	60	60
$\varphi_р$ (прогнозируемое значение)	0,79	0,82	0,83
$\varphi_д$ (экспериментальное значение)	0,82	0,80	0,78
$\Delta\varphi$ (расхождение результатов)	0,03	0,02	0,05
Погрешность, %	3,6	2,5	6,4

По результатам проведенных испытаний на скорости 60 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных 6,4 %.

Таблица 14 – Результаты эксперимента на 70 км/ч

V, км/ч	70	70	70
$\varphi_р$ (прогнозируемое значение)	0,82	0,81	0,80
$\varphi_д$ (экспериментальное значение)	0,79	0,78	0,79
$\Delta\varphi$ (расхождение результатов)	0,03	0,03	0,01
Погрешность, %	3,7	3,8	1,2

По результатам проведенных испытаний на скорости 70 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных 3,8 %.

Испытание на сухом асфальте на скорости 80-100 км/ч.

Входные данные:

Погодные условия: Температура окружающего воздуха 10-15 ^{0}С, без осадков, преимущественно солнечно.

Дорожное покрытие: Сухой асфальт, без уклона.

Скорость на начало торможения: 80 км/ч, 90 км/ч, 100 км/ч.

На рисунке 3.16 представлены результаты экспериментального исследования корреляции прогнозируемого и действительного коэффициента сцепления на скорости 80 км/ч на сухом асфальте.

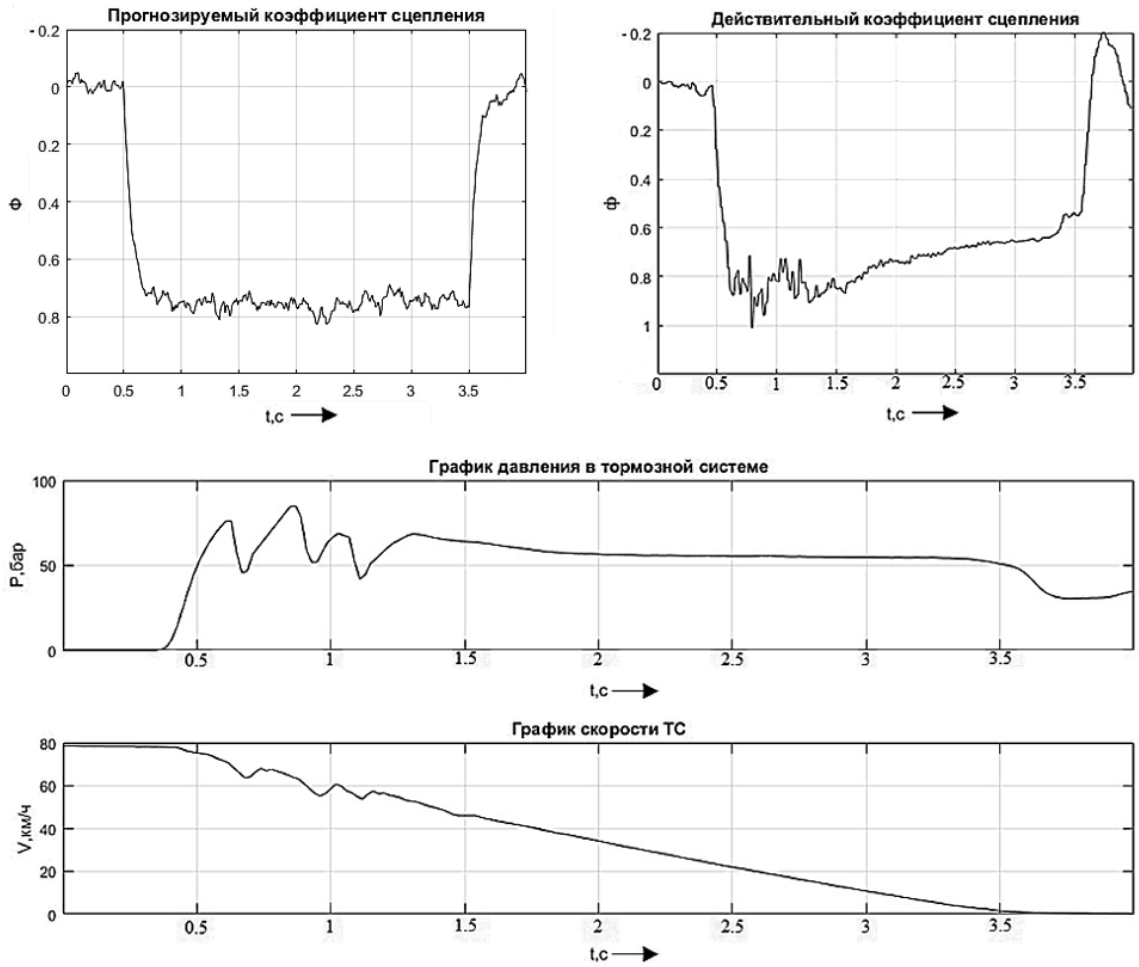


Рисунок 3.16 – Пример записи результатов проведения эксперимента на 80 км/ч

По результатам проведенного эксперимента были получены следующие результаты по трем заездам трех испытаний:

Таблица 15 – Результаты эксперимента на 80 км/ч

V, км/ч	80	80	80
$\varphi_р$ (прогнозируемое значение)	0,78	0,76	0,75
$\varphi_д$ (экспериментальное значение)	0,77	0,80	0,79
$\Delta\varphi$ (расхождение результатов)	0,01	0,04	0,04
Погрешность, %	1,2	5	5

По результатам проведенных испытаний на скорости 80 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных 5 %.

Таблица 16 – Результаты эксперимента на 90 км/ч

V, км/ч	90	90	90
$\varphi_р$ (прогнозируемое значение)	0,74	0,76	0,75
$\varphi_д$ (экспериментальное значение)	0,78	0,73	0,72
$\Delta\varphi$ (расхождение результатов)	0,04	0,03	0,03
Погрешность, %	5	4,1	4,2

По результатам проведенных испытаний на скорости 90 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных 4,2 %.

Таблица 17 – Результаты эксперимента на 100 км/ч

V, км/ч	100	100	100
$\varphi_р$ (прогнозируемое значение)	0,75	0,75	0,74
$\varphi_д$ (экспериментальное значение)	0,72	0,75	0,73
$\Delta\varphi$ (расхождение результатов)	0,03	0	0,02
Погрешность, %	4,2	0	2,7

По результатам проведенных испытаний на скорости 100 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных 4,2 %.

По итогу проведения испытательных заездов на сухом асфальте было выявлено, что предельные отклонения расчетного и экспериментального значений не превысили 6 %.

На рисунке 3.17 представлены средние значения прогнозируемого коэффициента сцепления и действительного по оси ординат и скорости ТС по оси абсцисс.

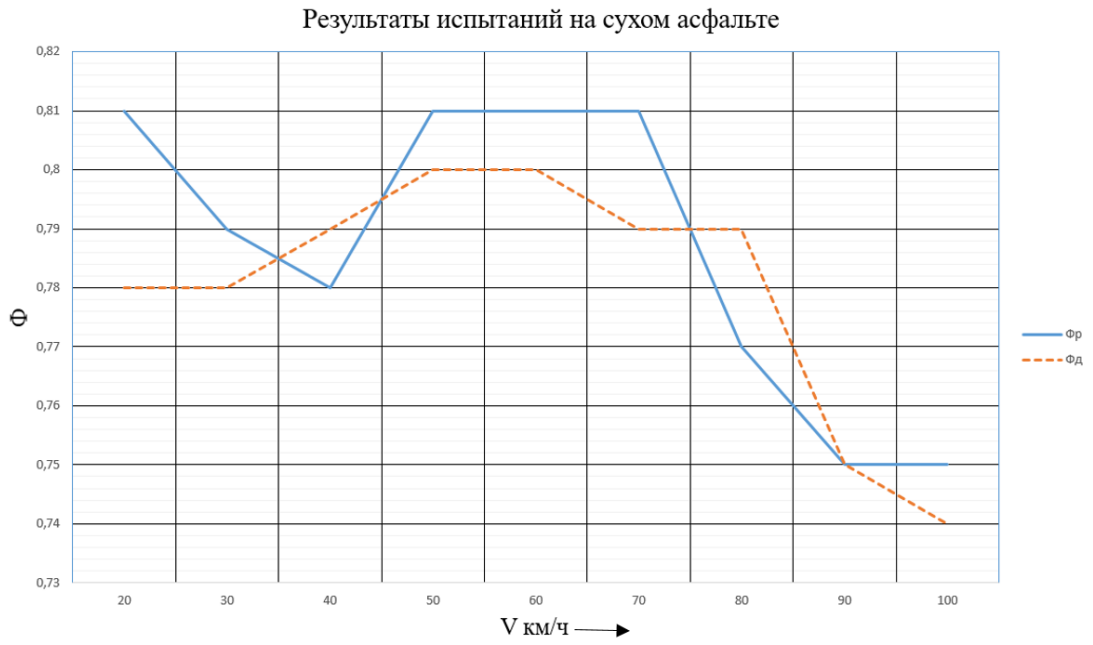


Рисунок 3.17 – Графики прогнозируемого и действительного коэффициентов сцепления по испытаниям на сухом асфальте

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

– на сухом асфальте на скорости до 70 км/ч сцепные свойства постоянны в допустимом диапазоне погрешности;

– на сухом асфальте отмечается снижение сцепных свойств на скорости свыше 70 км/ч.

3.9 **Экспериментальное исследование на мокром асфальте**

Испытание на мокром асфальте на скорости 20-40 км/ч.

Входные данные:

Погодные условия: Температура окружающего воздуха 15-20 ^{0}С, осадки средней интенсивности, пасмурно.

Дорожное покрытие: Мокрый асфальт, без уклона.

Скорость на начало торможения: 20 км/ч, 30 км/ч, 40 км/ч.

На рисунке 3.18 представлены результаты экспериментального исследования корреляции прогнозируемого и действительного коэффициента сцепления на скорости 30 км/ч на сухом асфальте.

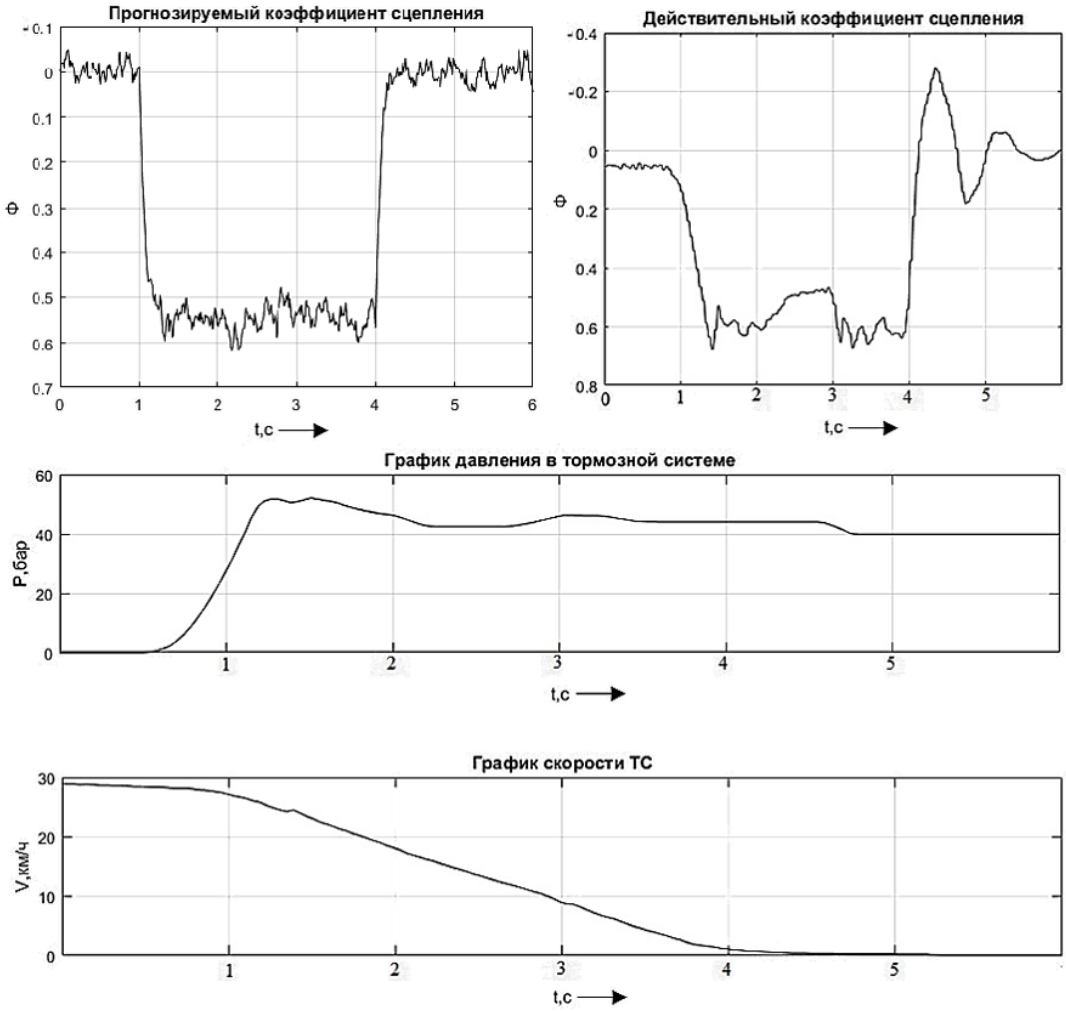


Рисунок 3.18 – Пример записи результатов проведения эксперимента на мокром асфальте на 30 км/ч

По результатам проведенного эксперимента были получены следующие результаты:

Таблица 18 – Результаты эксперимента на 20 км/ч

V, км/ч	20	20	20
$\varphi_р$ (прогнозируемое значение)	0,54	0,54	0,55
$\varphi_д$ (экспериментальное значение)	0,59	0,56	0,58
$\Delta\varphi$ (расхождение результатов)	0,05	0,02	0,03
Погрешность, %	8,4	3,5	5,1

По результатам проведенных испытаний на скорости 20 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных 8,4 %.

Таблица 19 – Результаты эксперимента на 30 км/ч

V, км/ч	30	30	30
$\varphi_р$ (прогнозируемое значение)	0,55	0,53	0,53
$\varphi_д$ (экспериментальное значение)	0,54	0,54	0,56
$\Delta\varphi$ (расхождение результатов)	0,01	0,01	0,03
Погрешность, %	1,8	1,8	5,3

По результатам проведенных испытаний на скорости 30 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных 5,3 %.

Таблица 20 – Результаты эксперимента на 40 км/ч

V, км/ч	40	40	40
$\varphi_р$(прогнозируемое значение)	0,54	0,53	0,51
$\varphi_д$(экспериментальное значение)	0,54	0,54	0,55
$\Delta\varphi$(расхождение результатов)	0	0,01	0,04
Погрешность, %	0	1,8	7,2

По результатам проведенных испытаний на скорости 40 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных 7,2 %.

Испытание на мокром асфальте на скорости 50-70 км/ч.

Входные данные:

Погодные условия: Температура окружающего воздуха плюс 15-20 ^{0}С, осадки низкой интенсивности, пасмурно.

Дорожное покрытие: Мокрый асфальт, без уклона.

Скорость: 50 км/ч, 60 км/ч, 70 км/ч.

На рисунке 3.19 представлены результаты экспериментального исследования корреляции прогнозируемого и действительного коэффициента сцепления на скорости 50 км/ч на сухом асфальте.

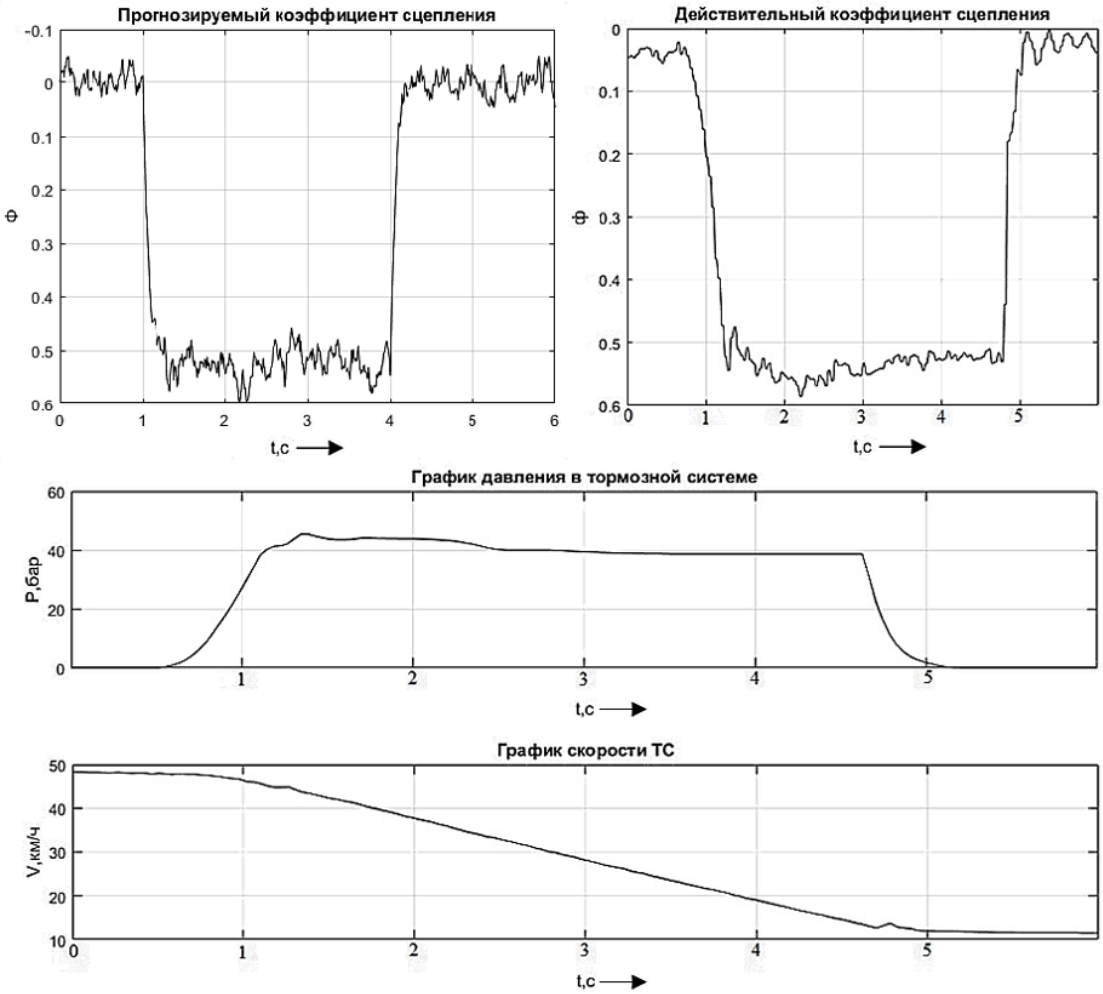


Рисунок 3.19 – Пример записи результатов проведения эксперимента на мокром асфальте на скорости 50 км/ч

По результатам проведенного эксперимента были получены следующие результаты по трем заездам:

Таблица 21 - Результаты эксперимента на 50 км/ч

V, км/ч	50	50	50
$\varphi_р$ (прогнозируемое значение)	0,51	0,52	0,50
$\varphi_д$ (экспериментальное значение)	0,52	0,49	0,49
$\Delta\varphi$ (расхождение результатов)	0,01	0,03	0,01
Погрешность, %	1,9	6,1	2

По результатам проведенных испытаний на скорости 50 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных 6,1 %.

Таблица 22 - Результаты эксперимента на 60 км/ч

V, км/ч	60	60	60
$\varphi_р$(прогнозируемое значение)	0,50	0,52	0,51
$\varphi_д$(экспериментальное значение)	0,50	0,50	0,49
$\Delta\varphi$(расхождение результатов)	0	0,02	0,02
Погрешность, %	0	4	4

По результатам проведенных испытаний на скорости 60 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных 4 %.

Таблица 23 - Результаты эксперимента на 70 км/ч

V, км/ч	70	70	70
$\varphi_р$(прогнозируемое значение)	0,49	0,50	0,48
$\varphi_д$(экспериментальное значение)	0,48	0,48	0,47
$\Delta\varphi$(расхождение результатов)	0,01	0,02	0,01
Погрешность, %	2	4	2

По результатам проведенных испытаний на скорости 70 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных 4 %.

Испытание на мокром асфальте на скорости 80-100 км/ч.

Входные данные:

Погодные условия: Температура окружающего воздуха плюс 15-20 ^{0}С, осадки средней интенсивности, пасмурно.

Дорожное покрытие: Мокрый асфальт, без уклона.

Скорость: 80 км/ч, 90 км/ч, 100 км/ч.

На рисунке 3.20 представлены результаты экспериментального исследования корреляции прогнозируемого и действительного коэффициента сцепления на скорости 80 км/ч на сухом асфальте.

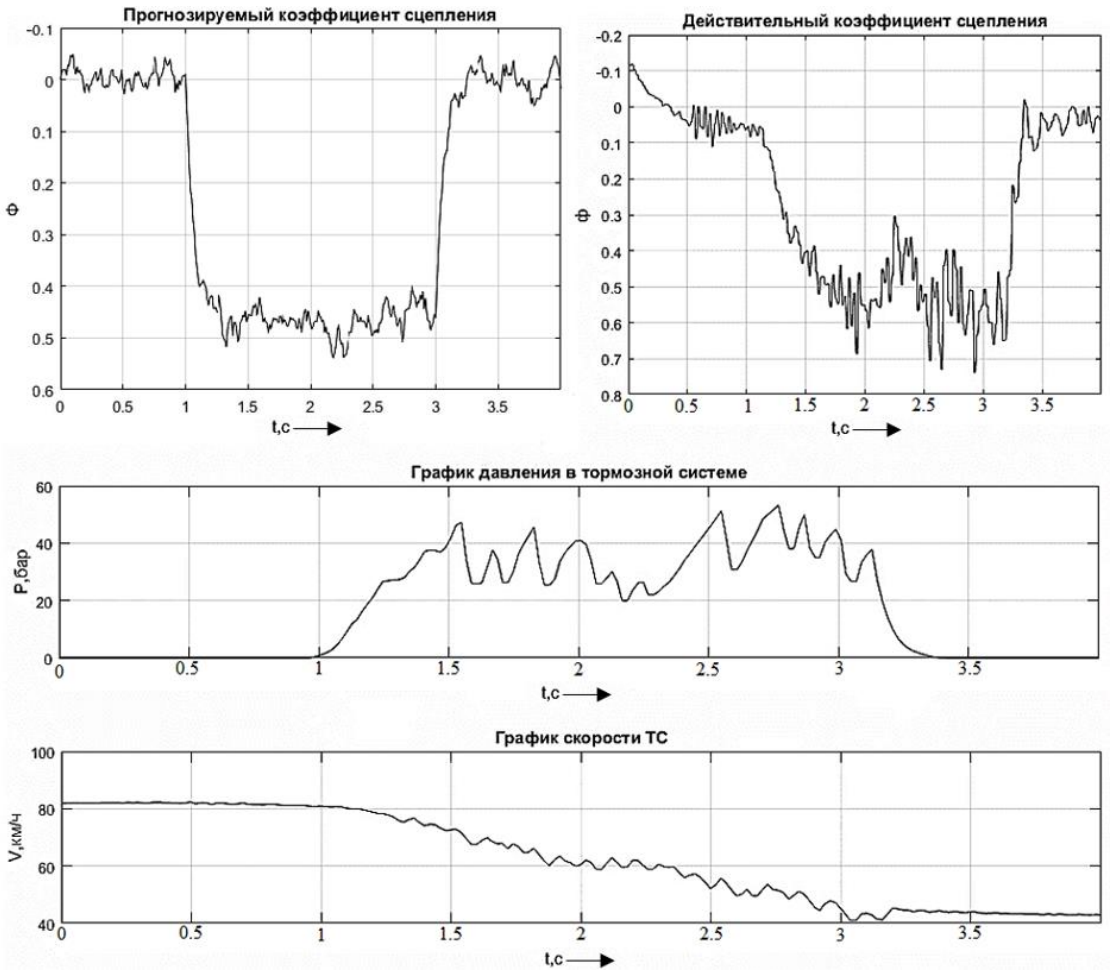


Рисунок 3.20 – Пример записи результатов проведения эксперимента на мокром асфальте на скорости 80 км/ч

По результатам проведенного эксперимента были получены следующие результаты:

Таблица 24 - Результаты эксперимента на 80 км/ч

V, км/ч	80	80	80
$\varphi_р$(прогнозируемое значение)	0,48	0,47	0,46
$\varphi_д$(экспериментальное значение)	0,45	0,45	0,47
$\Delta\varphi$(расхождение результатов)	0,03	0,02	0,01
Погрешность, %	6,6	4,4	2,1

По результатам проведенных испытаний на скорости 80 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных 6,6 %.

Таблица 25 – Результаты эксперимента на 90 км/ч

V, км/ч	90	90	90
$\varphi_р$(прогнозируемое значение)	0,45	0,44	0,44
$\varphi_д$(экспериментальное значение)	0,43	0,45	0,46
$\Delta\varphi$(расхождение результатов)	0,02	0,01	0,02
Погрешность, %	4,6	2,2	4,3

По результатам проведенных испытаний на скорости 90 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных 4,6 %.

Таблица 26 – Результаты эксперимента на 100 км/ч

V, км/ч	100	100	100
$\varphi_р$(прогнозируемое значение)	0,46	0,45	0,42
$\varphi_д$(экспериментальное значение)	0,44	0,44	0,45
$\Delta\varphi$(расхождение результатов)	0,02	0,01	0,03
Погрешность, %	4,5	2,2	6,6

По результатам проведенных испытаний на мокром асфальте на скорости до 100 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных 6,6 %.

Вывод по результатам испытаний САЭТ на мокром асфальте:

Предельная погрешность результатов экспериментальных и расчетных данных не превысила 8.4 %.

На рисунке 3.21 представлены средние значения прогнозируемого коэффициента сцепления и полученные значения действительного коэффициента сцепления.

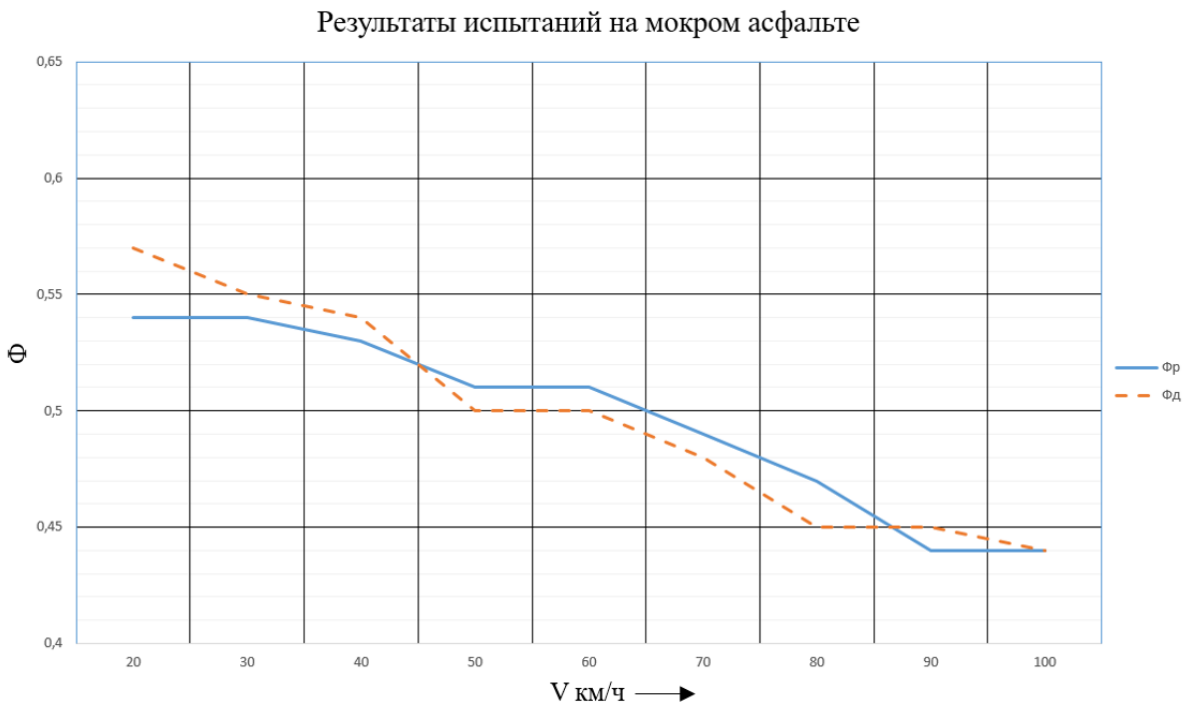


Рисунок 3.21 – Средние значения прогнозируемого и действительного коэффициента сцепления при испытании на мокром асфальте

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

– на мокром асфальте четко прослеживается снижение сцепных свойств с увеличением скорости на всем скоростном диапазоне движения.

3.10 **Экспериментальное исследование прогнозирования коэффициента сцепления на мокром базальте. (Имитация укатанного снежного покрытия)**

Поскольку мокрое базальтовое покрытие соответствует по величине коэффициента сцепления укатанному снежному покрытию, то оно было использовано в качестве опорной поверхности для проведения испытаний, соответствующих укатанному снегу. Внешний вид покрытия представлен на рисунке 3.22

Входные параметры датчиков для прогнозирования коэффициента сцепления этого эксперимента были смоделированы в соответствии с характеристиками движения по укатанному снежному покрытию. Данные

были взяты в соответствии с записанными значениями датчиков при тестировании автомобилей в зимний период.

Рисунок 3.22 – Базальтовое дорожное покрытие

Испытание на мокром базальте на скорости 20-40 км/ч.

Входные данные:

Имитируемые погодные условия: Температура окружающего воздуха минус 5 ^{0}C, осадки высокой интенсивности, срабатывание ABS в текущем цикле движения.

Дорожное покрытие: Мокрый базальт, без уклона.

Скорость: 20 км/ч, 30 км/ч, 40 км/ч.

На рисунке 3.23 представлены результаты экспериментального исследования корреляции прогнозируемого и действительного коэффициента сцепления на скорости 20 км/ч на мокром базальте.

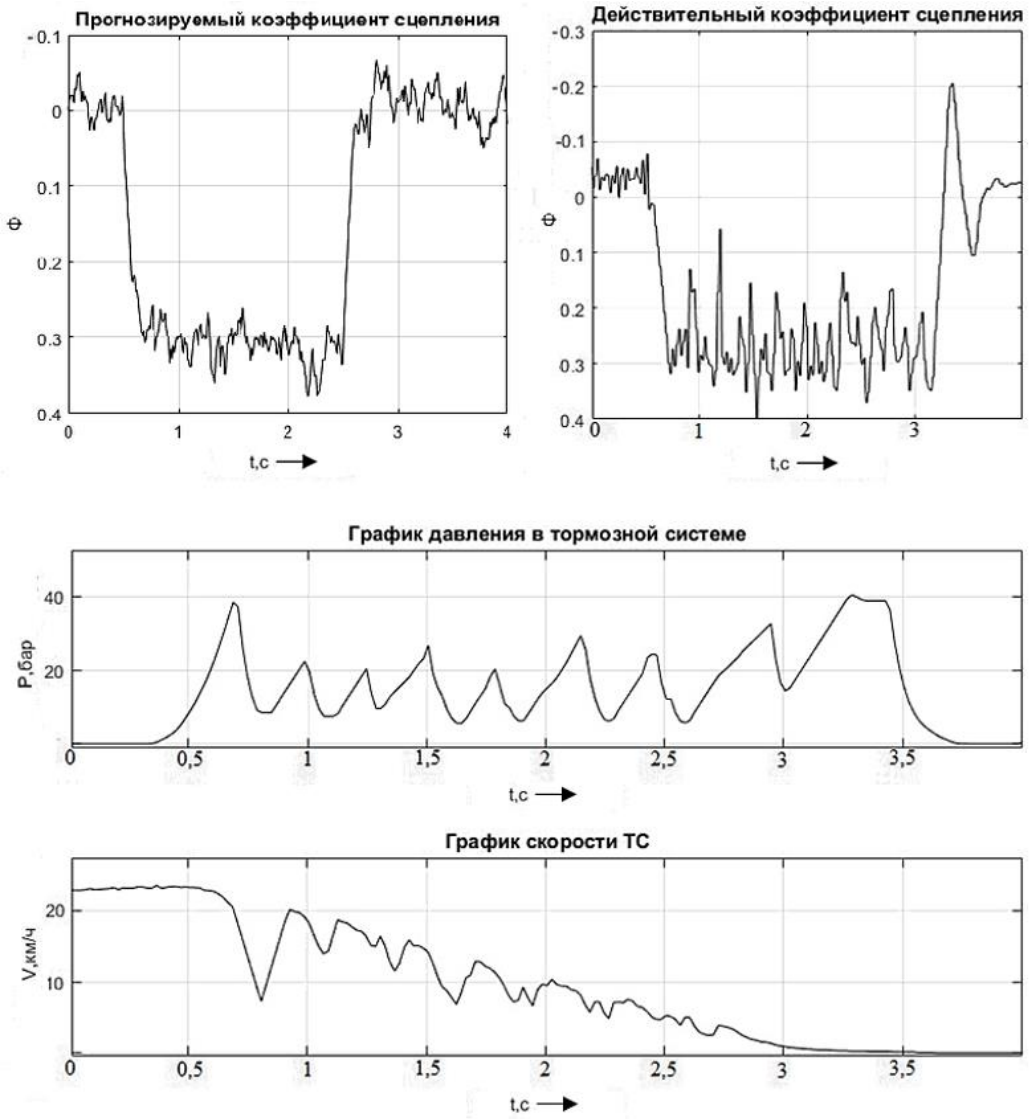


Рисунок 3.23 – Пример записи экспериментальных данных на мокром базальтовом покрытии на скорости 20 км/ч

Таблица 27 – Результаты эксперимента на 20 км/ч

V, км/ч	20	20	20
$\varphi_р$(прогнозируемое значение)	0,34	0,33	0,34
$\varphi_д$(экспериментальное значение)	0,32	0,30	0,31
$\Delta\varphi$(расхождение результатов)	0,02	0,03	0,03
Погрешность, %	6,2	10	9,6

По результатам проведенных испытаний на скорости 20 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных 10 %.

Таблица 28 – Результаты эксперимента на 30 км/ч

V, км/ч	30	30	30
$\varphi_р$(прогнозируемое значение)	0,31	0,33	0,32
$\varphi_д$(экспериментальное значение)	0,30	0,31	0,30
$\Delta\varphi$(расхождение результатов)	0,01	0,02	0,02
Погрешность, %	3,3	6,4	6,6

По результатам проведенных испытаний на скорости 30 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных составила 6,6 %.

Таблица 29 – Результаты эксперимента на 40 км/ч

V, км/ч	40	40	40
$\varphi_р$(прогнозируемое значение)	0,32	0,31	0,32
$\varphi_д$(экспериментальное значение)	0,30	0,33	0,31
$\Delta\varphi$(расхождение результатов)	0,02	0,02	0,01
Погрешность, %	6,6	6	3,2

По результатам проведенных испытаний на скорости 40 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных составила 6,6 %.

Испытание на мокром базальте на скорости 50-70 км/ч.

Входные данные:

Имитируемые погодные условия: Температура окружающего воздуха минус 5 ^{0}С, осадки высокой интенсивности, срабатывание ABS в текущем цикле движения.

Дорожное покрытие: Мокрый базальт, без уклона.

Скорость: 50 км/ч.

На рисунке 3.24 представлены результаты экспериментального исследования корреляции прогнозируемого и действительного коэффициента сцепления на скорости 50 км/ч на мокром базальте.

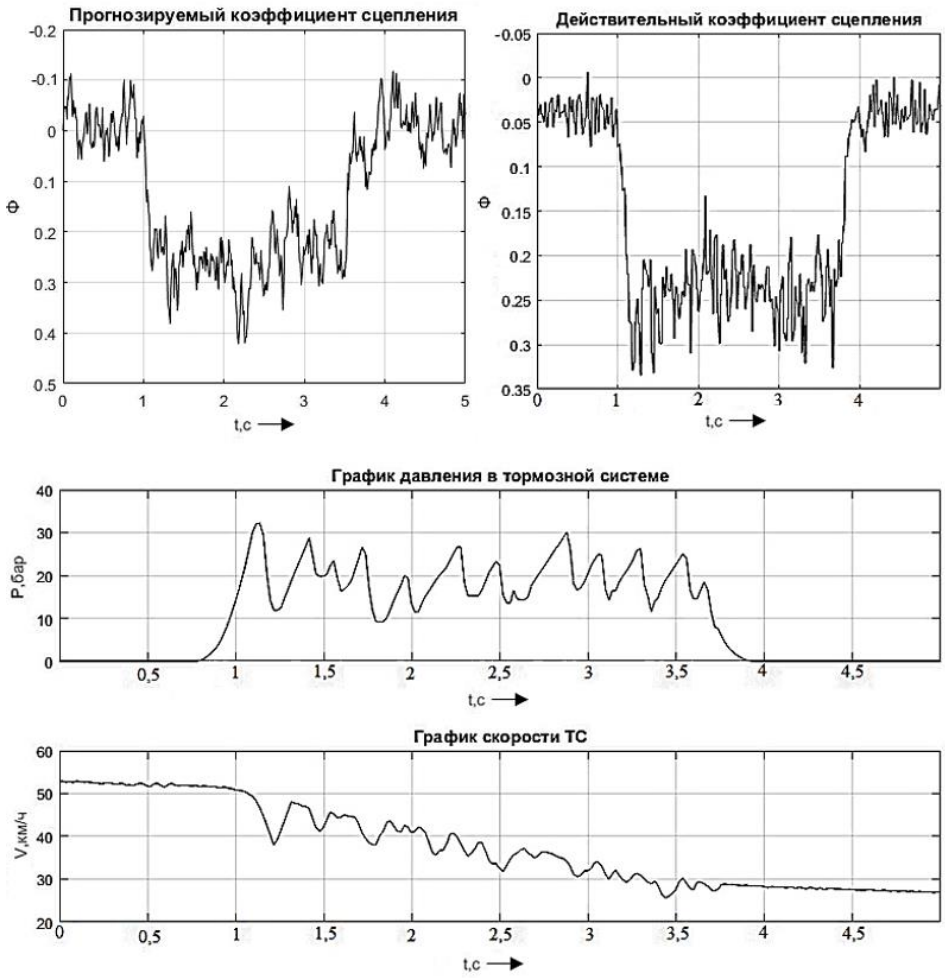


Рисунок 3.24 – Пример записи экспериментальных данных на мокром базальтовом покрытии на скорости 50 км/ч

По результатам проведенного эксперимента были получены следующие результаты по трем заездам:

Таблица 30 – Результаты эксперимента на 50 км/ч

V, км/ч	50	50	50
$\varphi_р$(прогнозируемое значение)	0,29	0,30	0,29
$\varphi_д$(экспериментальное значение)	0,27	0,28	0,28
$\Delta\varphi$(расхождение результатов)	0,02	0,02	0,01
Погрешность, %	7,4	7,1	3,5

По результатам проведенных испытаний на скорости 50 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных составила 7,4 %.

Таблица 31 – Результаты эксперимента на 60 км/ч

V, км/ч	60	60	60
$\varphi_р$(прогнозируемое значение)	0,28	0,27	0,28
$\varphi_д$(экспериментальное значение)	0,27	0,27	0,26
$\Delta\varphi$(расхождение результатов)	0,01	0	0,02
Погрешность, %	3,7	0	7,6

По результатам проведенных испытаний на скорости 60 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных составила 7,6 %.

На рисунке 3.25 представлены результаты экспериментального исследования корреляции прогнозируемого и действительного коэффициента сцепления на скорости 50 км/ч на мокром базальте.

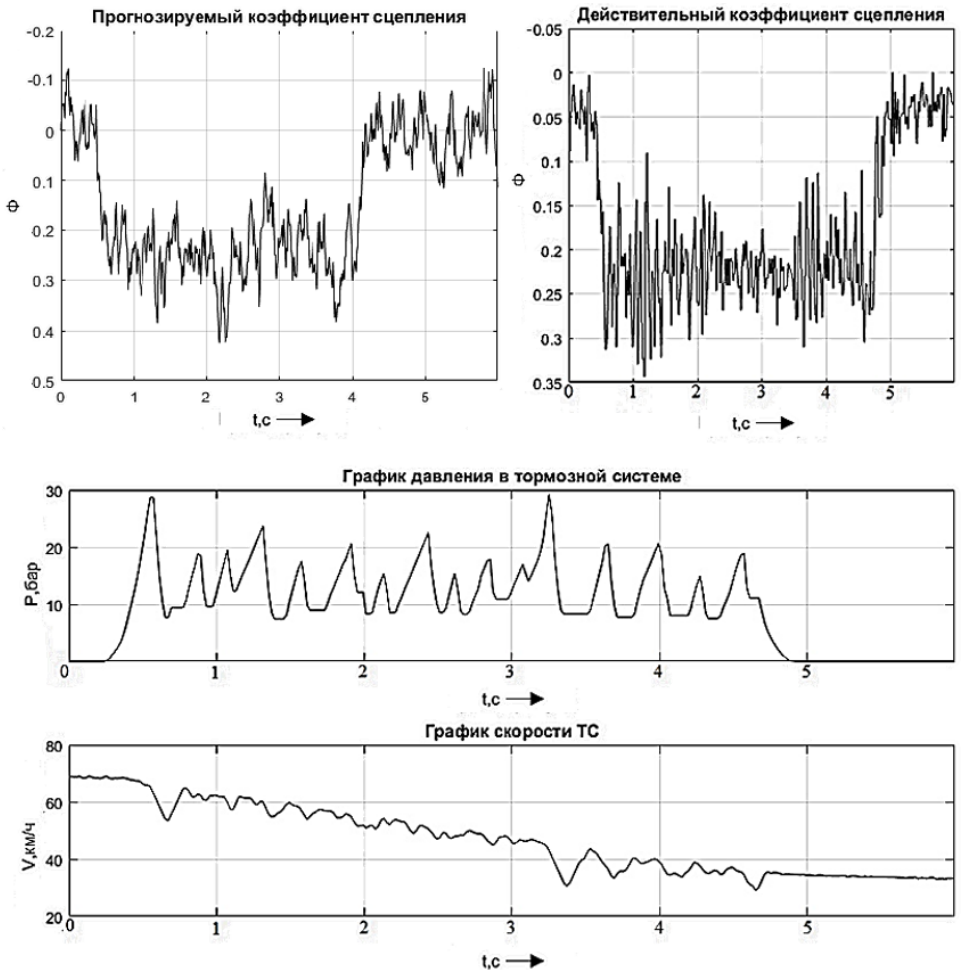


Рисунок 3.25 – Пример записи экспериментальных данных на мокром базальтовом покрытии на скорости 70 км/ч

Таблица 32 – Результаты эксперимента на 70 км/ч

V, км/ч	70	70	70
$\varphi_р$(прогнозируемое значение)	0,26	0,26	0,27
$\varphi_д$(экспериментальное значение)	0,24	0,25	0,25
$\Delta\varphi$(расхождение результатов)	0,02	0,01	0,02
Погрешность, %	8,3	4	8

По результатам проведенных испытаний на скорости 70 км/ч максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных составила 8,3 %.

На рисунке 3.26 представлены средние значения прогнозируемого коэффициента сцепления и действительного.

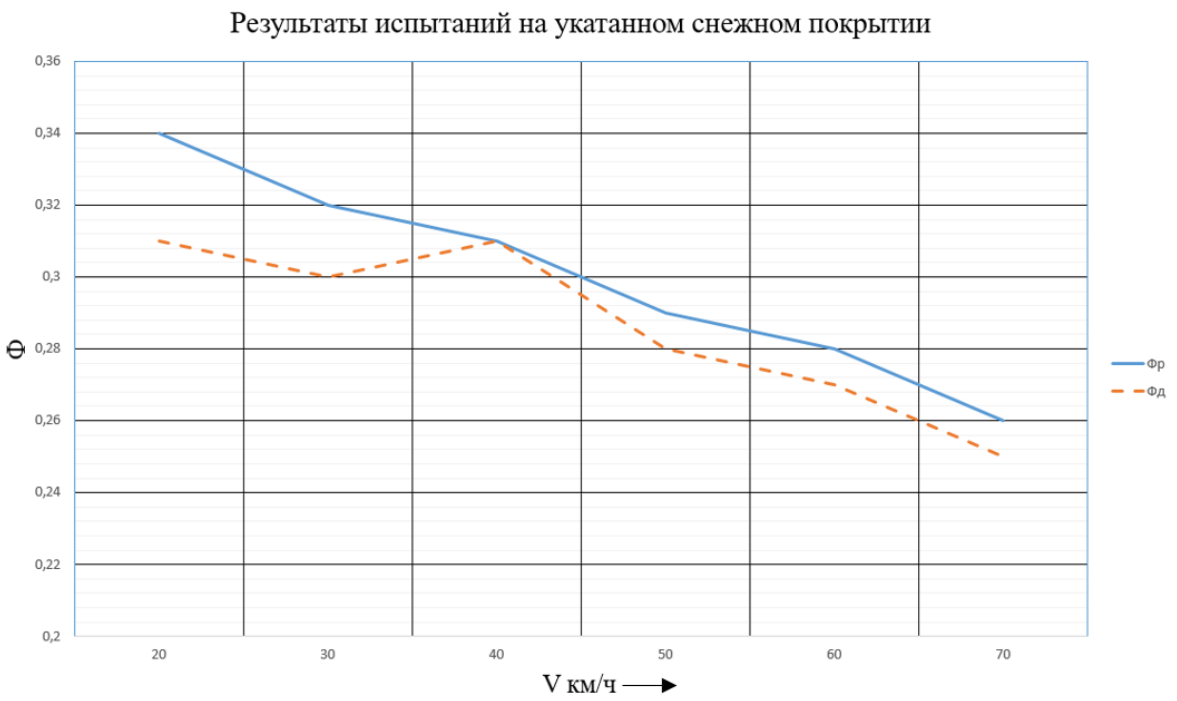


Рисунок 3.26 – Средние значения прогнозируемого коэффициента сцепления и действительного при испытании на мокром базальте

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

– на укатанном снежном покрытии четко прослеживается снижение сцепных свойств при торможении с увеличением скорости.

Сравнение результатов расчетных и экспериментальных исследований указывает на достаточно близкую сходимость. Максимальное несовпадение по прогнозируемому и действительному коэффициенту сцепления не более 10 %. Характер изменения расчетных значений соответствует экспериментальным. Это свидетельствует о значительной степени адекватности разработанной математической модели.

3.11 **Экспериментальное исследование на соответствие прогнозируемого времени достижения установившегося замедления действительному**

В данном эксперименте были проведены тесты торможения и рассмотрена характеристика времени достижения установившегося замедления $t_{\text{н}}$ [102]. Полученное экспериментальное значение проверялось на соответствие с расчетной характеристикой замедления $t'_{\text{н}}$, полученной при математическом моделировании.

Испытание экспериментальной проверки зависимости $\mathbf{t}_{\text{н}} = f(\boldsymbol{\varphi})$ при значении φ, соответствующему движению по укатанному снежному покрытию.

Погодные условия: Температура окружающего воздуха минус 5 ^{0}C, осадки высокой интенсивности, срабатывание ABS в текущем цикле движения.

Дорожное покрытие: Укатанный снег, без уклона.

Скорость: 60 км/ч.

На рисунках 3.27, 3.28 представлены результаты моделирования и экспериментального исследования определение времени достижения установившегося замедления на укатанном снежном покрытии.

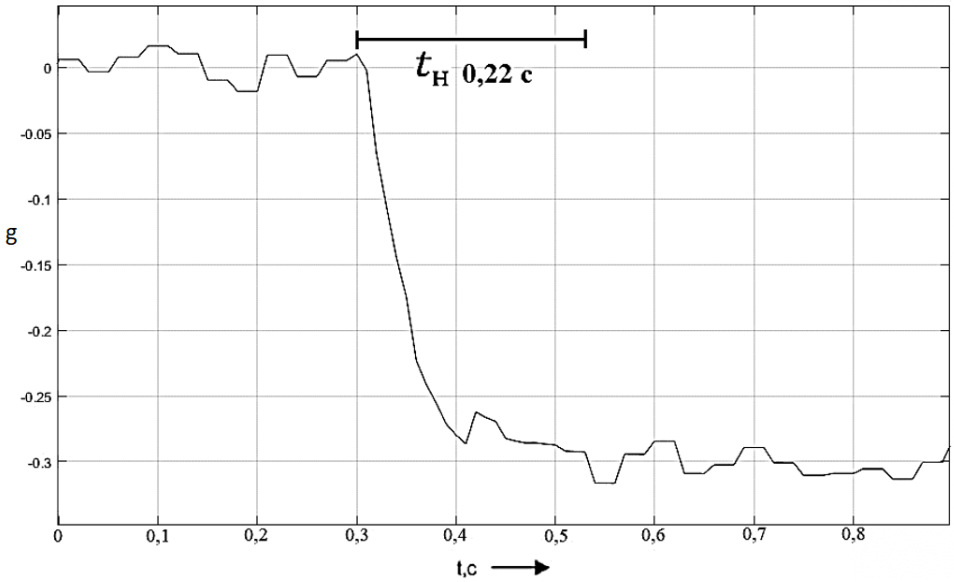


Рисунок 3.27 – Определение времени достижения установившегося замедления при моделировании торможения на укатанном снежном покрытии

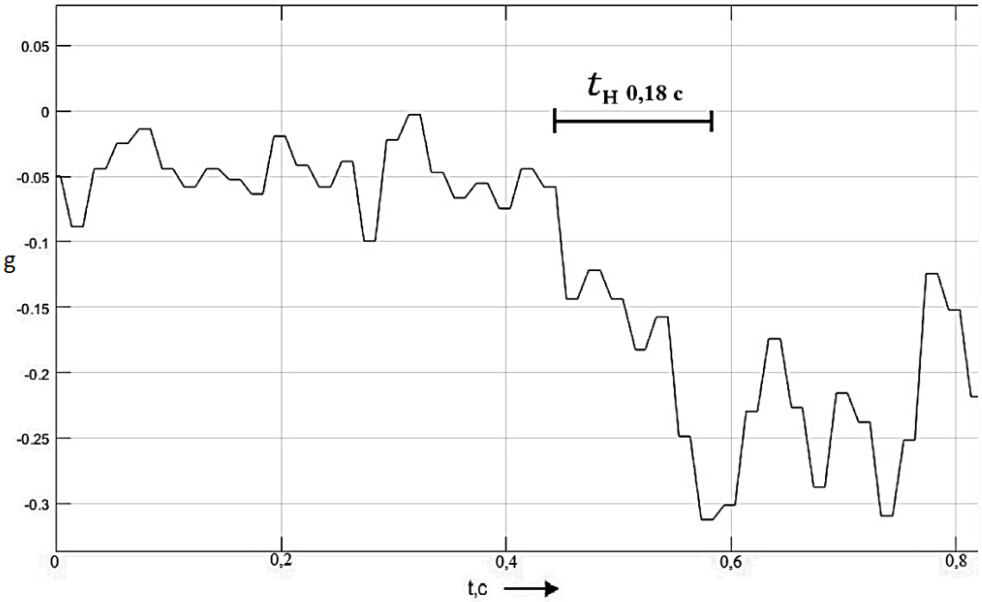


Рисунок 3.28 – Определение времени достижения установившегося замедления при экспериментальном торможении на снежном покрытии

Таблица 33 – Результаты моделирования значения $t'_{\text{н}}$ и экспериментального значения $t_{\text{н}}$ на снежном покрытии

№ испытания	1	2	3
Прогнозируемое $t'_{\text{н}}$, с	0,22	0,22	0,22
Действительное $t_{\text{н}}$, с	0,18	0,19	0,18
Погрешность, с	0,04	0,03	0,04

При проведении испытаний на укатанном снежном покрытии прогнозируемое время достижения установившегося замедления и действительное имеют максимальное расхождение в 0,04 секунды.

Испытание экспериментальной проверки зависимости $\mathbf{t_н} = f(\boldsymbol{\varphi})$ при значении $\boldsymbol{\varphi}$, соответствующему движению по мокрому асфальтированному покрытию.

Погодные условия: Температура окружающего воздуха плюс 15 ^{0}С, осадки высокой интенсивности.

Дорожное покрытие: Мокрый асфальтобетон, без уклона.

Скорость: 60 км/ч.

На рисунках 3.29, 3.30 представлены результаты моделирования и экспериментального исследования определение времени достижения установившегося замедления на мокром асфальте.

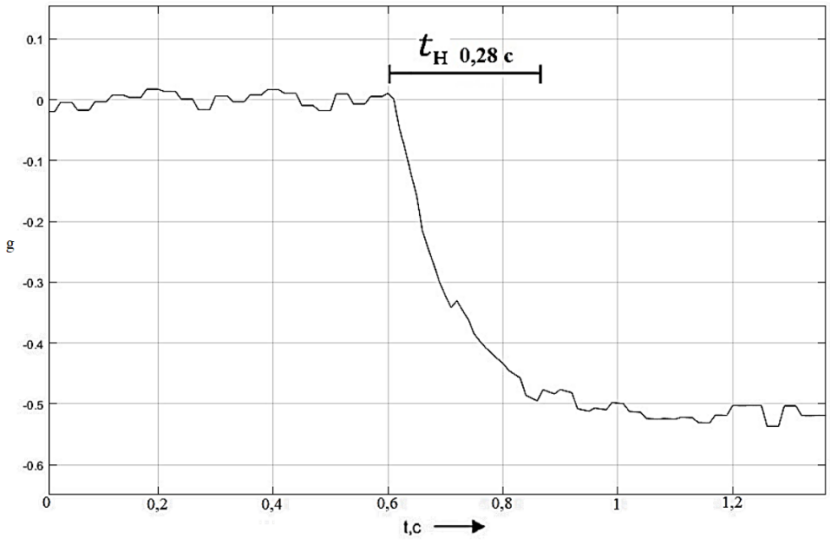


Рисунок 3.29 – Определение времени достижения установившегося замедления при моделировании торможения на мокром асфальте

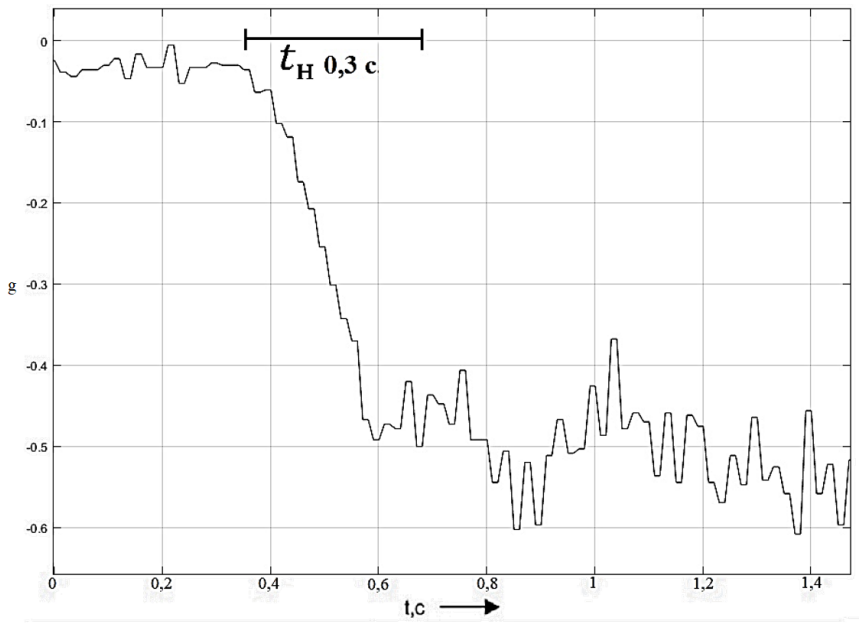


Рисунок 3.30 – Зависимость времени достижения установившегося замедления при экспериментальном торможении на мокром асфальте

Таблица 34 - Результаты моделирования значения $t'_{\text{н}}$ и экспериментального значения $t_{\text{н}}$ на мокром асфальте

№ испытания	1	2	3
Прогнозируемое $t'_{\text{н}}$, с	0,28	0,28	0,28
Действительное $t_{\text{н}}$, с	0,30	0,29	0,30
Погрешность, с	0,02	0,01	0,02

При проведении испытаний на мокром асфальтированном покрытии прогнозируемое время достижения установившегося замедления и действительное имеют максимальное расхождение в 0,02 секунды.

Испытание экспериментальной проверки зависимости $\text{t}_{\text{н}} = f(\varphi)$ при значении φ, соответствующему движению по сухому асфальтированному покрытию.

Погодные условия: Температура окружающего воздуха плюс 15 ^{0}С, осадки отсутствуют.

Дорожное покрытие: Сухой асфальтобетон, без уклона.

Скорость: 60 км/ч.

На рисунках 3.31, 3.32 представлены результаты моделирования и экспериментального исследования определение времени достижения установившегося замедления на сухом асфальте.

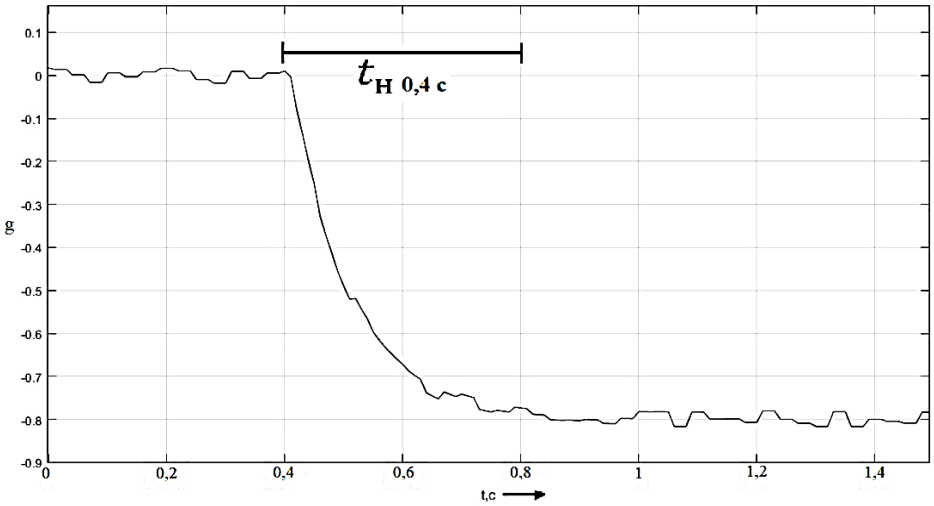


Рисунок 3.31 – Зависимость времени достижения установившегося замедления при моделировании торможения на сухом асфальте

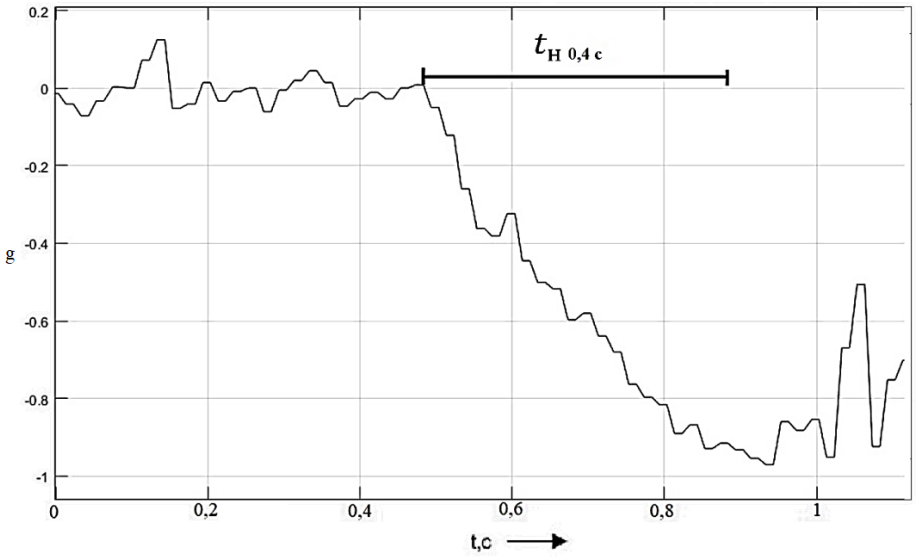


Рисунок 3.32 – Зависимость времени достижения установившегося замедления при экспериментальном торможении на сухом асфальте

Таблица 35 – Результаты моделирования значения $t'_{н}$ и экспериментального значения $t_{н}$ на сухом асфальте

№ испытания	1	2	3
Прогнозируемое $t'_{н}$, с	0,40	0,40	0,40
Действительное $t_{н}$, с	0,40	0,39	0,41
Погрешность, с	0	0,01	0,01

При проведении испытаний на сухом асфальтированном покрытии прогнозируемое время достижения установившегося замедления и действительное имеют максимальное расхождение в 0,01 секунды.

По итогам испытания была доказана зависимость времени достижения установившегося замедления от текущего коэффициента сцепления. Характер кривой достижения установившегося замедления идентичен для всех типов покрытия, но в условиях низкого коэффициента сцепления достижение максимального значения происходит быстрее. Соответственно, справедливо полагать, что для правильного расчета тормозного пути необходимо вносить поправочные коэффициенты, соответствующие прогнозируемому коэффициенту сцепления.

Исходя из результатов исследования, описанных в данном разделе, установлено, что стандартная формула расчета тормозного пути, где переменная времени достижения установившегося замедления $t_{н}$ принимается константой, не может быть применима во всех случаях и имеет зависимость от внешних условий, в частности от текущего коэффициента сцепления с опорной поверхностью φ. Характер этой зависимости представлен на рисунке 3.33.

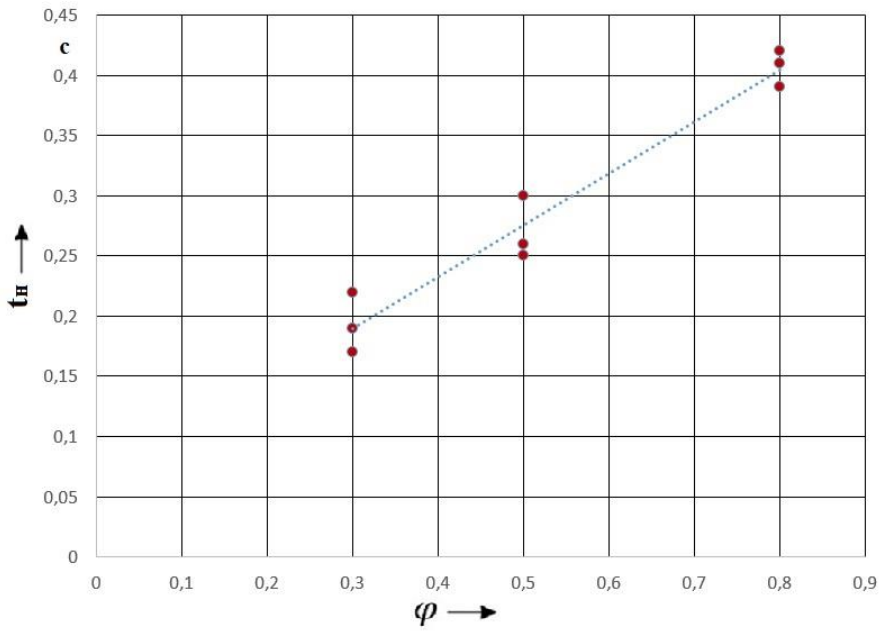


Рисунок 3.33 – Характер зависимости $t_н$ от φ

В стандартном виде расчет времени тормозного пути имеет следующий вид:

$$t_т = 0{,}5t_н + t_{пр} + \frac{K_э V_0}{\varphi g} \quad (32)$$

Разница значений $t_н$ в зависимости от коэффициента сцепления имеет разброс от максимального к минимальному 0,22 секунды. Например, при скорости 90 км/ч за 0,22 секунды автомобиль проезжает 5,5 метров. Если переменная $t_н$ в расчетах алгоритма применяется как постоянное среднее значение, то при несвоевременном воздействии на тормозной привод возможно увеличение погрешности в расчетах тормозного пути, что может привести к столкновению.

Итогом проведения испытаний, описанных в пункте 3.11, на соответствие прогнозируемого времени достижения установившегося замедления действительному, была доказана верность зависимости $t_н = f(\varphi)$, предложенной во второй главе данной работы.

3.12 **Проведение испытаний на соответствие расчетного тормозного пути математической модели и тормозного пути, полученного экспериментально**

В эксперименте проводились испытания торможения автомобиля перед неподвижной мишенью, имитирующей ТС, в автоматическом режиме функционирования САЭТ. Целью данного эксперимента являлся сравнительный анализ расчетного тормозного пути $S_{\text{т}}$ и реального тормозного пути $S'_{\text{т}}$.

Для проведения испытаний на соответствие прогнозируемого и действительного тормозного пути были проведены по три испытательных торможения на трех типах покрытия:

– сухой асфальт;
– мокрый асфальт;
– укатанный снег.

На рисунках 3.34 и 3.35 показано состояние дорожного покрытия, на котором проводилось испытательное торможение и внешний вид мишени, относительно которой считается дистанция торможения радарным сенсором.

Рисунок 3.34 – Внешний вид мишени и состояния покрытия при проведении испытаний на мокром асфальте

Рисунок 3.35 – Внешний вид мишени и состояния покрытия при проведении испытаний на обледенелом покрытии

На рисунках 3.36 и 3.37 приведены графики сравнительного анализа расчетного тормозного пути $S_т$ и реального тормозного пути $S'_т$ на примере торможения с 25 км/ч (7 м/с) на мокром асфальте.

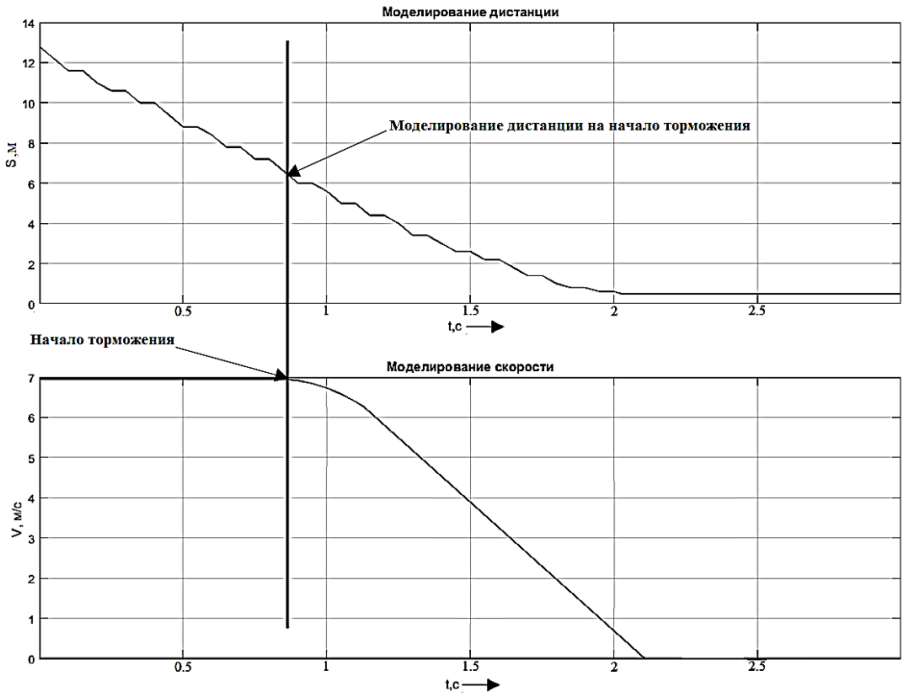


Рисунок 3.36 – Пример записи данных моделирования торможения САЭТ в Simulink на мокром асфальте

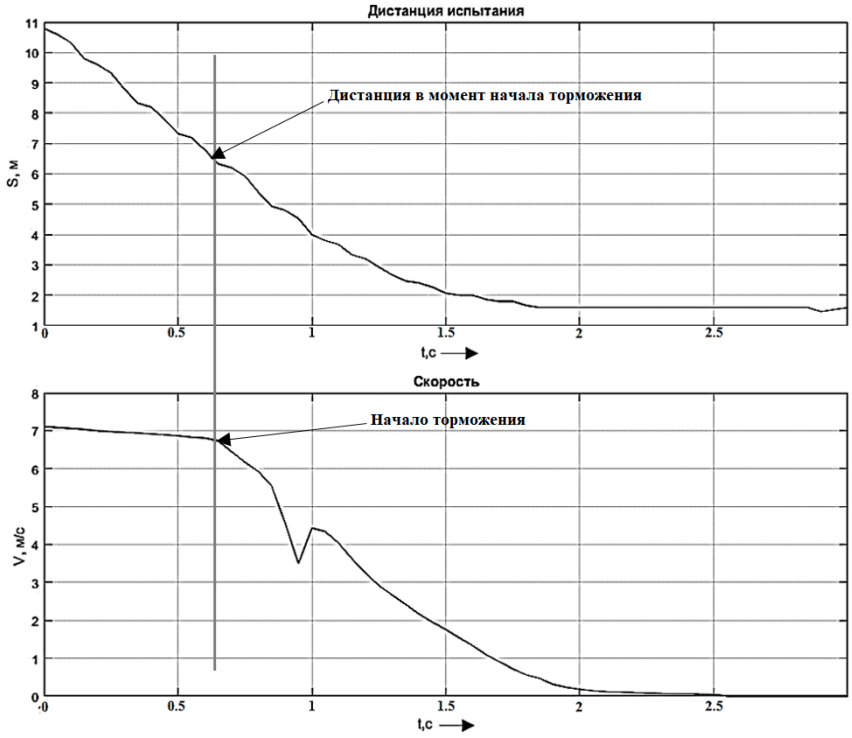


Рисунок 3.37 – Пример записи экспериментальных данных испытаний САЭТ на мокром асфальте

На графиках отображено изменение дистанции в процессе торможения и непосредственно момент начала торможения. Сравниваются значения дистанций на момент начала торможения.

Результаты проведенного эксперимента представлены в таблице 36.

Таблица 36 – Результаты проведения эксперимента сравнения $S_т$ и $S'_т$.

№	Покрытие	V, км/ч	$S_т$, м	$S'_т$, м	ΔS, м	%
1	Сухой асфальтобетон	25	4,3	4,2	0,1	2,3
2		25	4,2	4,2	0	0
3		25	4,3	4,2	0,1	2,3
1	Мокрый асфальтобетон	25	6,2	6,1	0,1	2,3
2		25	6,2	6,2	0	0
3		25	6,3	6,5	0,2	3,0
1	Укатанный снег	25	8,1	8,3	0,2	2,4
2		25	8,2	8,3	0,1	1,2
2		25	8,1	8,4	0,3	3,5

Из проведения данного эксперимента получены результаты, что расчетный и экспериментальный тормозные пути на скорости 25 км/ч на различных дорожных покрытиях отличаются не более чем на 3,5 %.

3.13 **Выводы по проведению экспериментального исследования в Главе 3**

1. Описана методика проведения экспериментального исследования разработанного алгоритма системы автоматического экстренного торможения, которая включает в себя:

– испытания на соответствие расчётного времени работы тормозного привода действительному ($t_{\text{пр}}$) ;

– испытания на проверку соответствия действительного коэффициента сцепления $\varphi_{\text{д}}$ с дорожным полотном спрогнозированному значению $\varphi_{\text{р}}$;

– испытания на соответствие прогнозируемого времени достижения установившегося замедления действительному ($t_{\text{н}}$);

– испытания на соответствие расчетного тормозного пути математической модели и тормозного пути, полученного экспериментально.

2. Проведены испытания на проверку соответствия расчётного времени работы тормозного привода действительному, в зависимости от установленной конфигурации активной безопасности. По результатам испытания доказана зависимость времени задержки тормозного привода от типа тормозной системы и установленной конфигурации активной безопасности. Получено, что время срабатывания тормозного привода может быть снижено до 30 %, в следствие применения предварительного увеличения давления в тормозной системе, что, в свою очередь, доказывает верность предложенной зависимости уточненного расчета остановочного пути системы автоматического экстренного торможения от установленной конфигурации активной безопасности ТС.

3. Проведены испытания на соответствие действительного коэффициента сцепления $\varphi_д$ с дорожным полотном спрогнозированному значению $\varphi_р$ соответствующим трем типам покрытия: сухой асфальт, мокрый асфальт, укатанный снег.

По итогам испытаний были получены максимальные значения погрешности:

- сухой асфальт 6 %;
- мокром асфальт 6,6 %;
- укатанный снег 8,3 %.

4. Проведено экспериментальное исследование на соответствие прогнозируемого времени достижения установившегося замедления действительному. По итогам испытания была доказана предложенная функция зависимости времени достижения установившегося замедления от текущего коэффициента сцепления.

5. Проведено экспериментальное исследование на соответствие расчетного тормозного пути математической модели и тормозного пути, полученного экспериментально. Для проведения испытаний на соответствие прогнозируемого и действительного тормозного пути были проведены по три испытательных торможения на трех типах покрытия:

- сухой асфальт;
- мокрый асфальт;
- укатанный снег.

По итогам проведения данного эксперимента получены результаты, в которых отражено, что погрешность расчетного и экспериментального тормозных путей отличаются не более, чем на 3,5 %.

4 Технико-экономическая оценка эффективности синтезированного алгоритма работы системы автоматического экстренного торможения

4.1 Функциональные испытания САЭТ, включающей разработанный алгоритм

Поскольку главным показателем эффективности работы САЭТ является способность предотвратить столкновение с препятствием и минимизация последствий столкновения путем автоматической активации тормозного привода, то для оценки эффективности был проведен ряд тестов функционирования разработанной системы [106]. Испытания на эффективность работы предложенного алгоритма функционирования САЭТ были проведены в два этапа.

В первом случае испытания проходили, с алгоритмом расчета остановочного пути, не учитывающего поправочные коэффициенты:

$$S_{\text{о}} = V_{\text{ср}} * (t_{\text{з}} + t_{\text{пр}} + \frac{1}{2} t_{\text{н}}) + \frac{K_{\text{э}} V_{\text{ср}}^2}{2\varphi g}; \quad (32)$$

Во втором случае испытания проходили, с алгоритмом расчета, учитывающим поправочные коэффициенты.

$$S_{\text{т}}^{'} = V_{\text{ср}} * (t_{\text{з}} * k_{\text{з}} + t_{\text{пр}} * k_{\text{пр}} + \frac{1}{2} t_{\text{н}} * k_{\text{н}}) + \frac{K_{\text{э}} V_{\text{ср}}^2}{2\varphi_{\text{р}} g}; \quad (33)$$

$k_{\text{пр}}$ – коэффициент работы тормозного привода;

$k_{\text{н}}$ – коэффициент достижения установившегося замедления;

$k_{\text{з}}$ – коэффициент запаса тормозного пути;

$\varphi_{\text{р}}$ – прогнозируемый коэффициент сцепления;

$K_{\text{э}}$ – коэффициент эффективности тормозной системы.

4.2 Функциональная оценка эффективности САЭТ на торможение перед стационарной мишенью

Для функциональной оценки эффективности предложенного алгоритма САЭТ были проведены тесты работы системы в следующих дорожных условиях:

– сухой асфальтобетон;

– мокрый асфальтобетон;

– укатанный снег.

Внешний вид мишени и объекта испытаний представлен на рисунке 4.1

Рисунок 4.1 – Внешний вид объекта проведения испытаний и мягкой мишени

Проведение оценки эффективности работы САЭТ на сухом асфальте.

В качестве расчетной дистанции для начала экстренного торможения использовалась стандартная формула без корректирующих коэффициентов.

Погодные условия: Температура окружающего воздуха плюс 15-20 ^{0}С, без осадков, преимущественно солнечно.

Дорожное покрытие: Сухой асфальт, без уклона.

Скорость на начало торможения: 6 м/с (21,6 км/ч)

На рисунке 4.2 представлены результаты проведения испытания торможения перед неподвижной мишенью на сухом асфальте без учета корректирующих коэффициентов

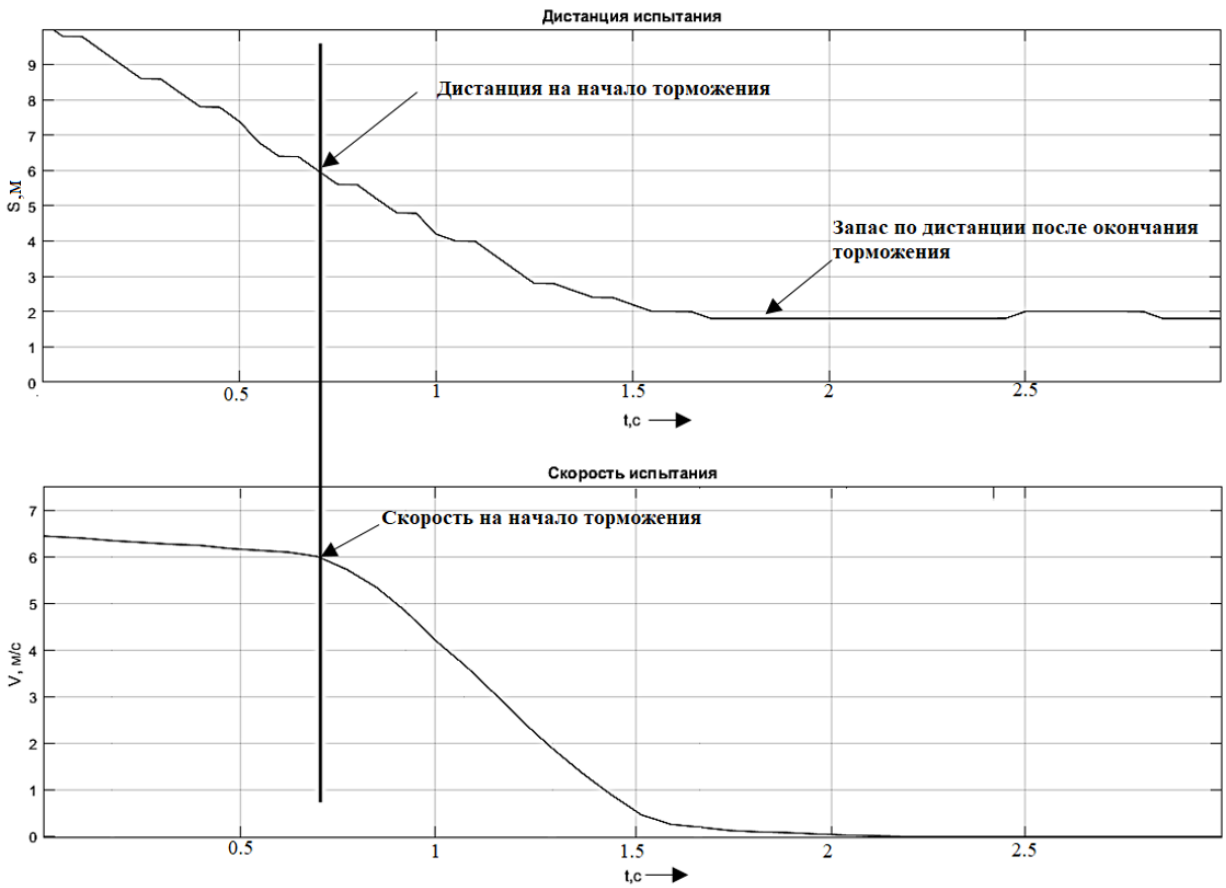


Рисунок 4.2 – Результаты проведения испытания без корректирующих коэффициентов

По результатам проведенного испытания были получены следующие значения параметров:

– дистанция на начало торможения S = 6 метров;

– дистанция до препятствия после окончания торможения S = 1.9 метра;

В качестве расчетной дистанции для начала экстренного торможения использовалась формула расчета с учетом корректирующих коэффициентов.

Погодные условия: Температура окружающего воздуха плюс 15-20 ^{0}C, без осадков, преимущественно солнечно.

Дорожное покрытие: Сухой асфальт, без уклона.

Скорость на начало торможения: 6 м/с (21,6 км/ч)

На рисунке 4.3 представлены результаты проведения испытания торможения перед неподвижной мишенью на сухом асфальте с учетом корректирующих коэффициентов.

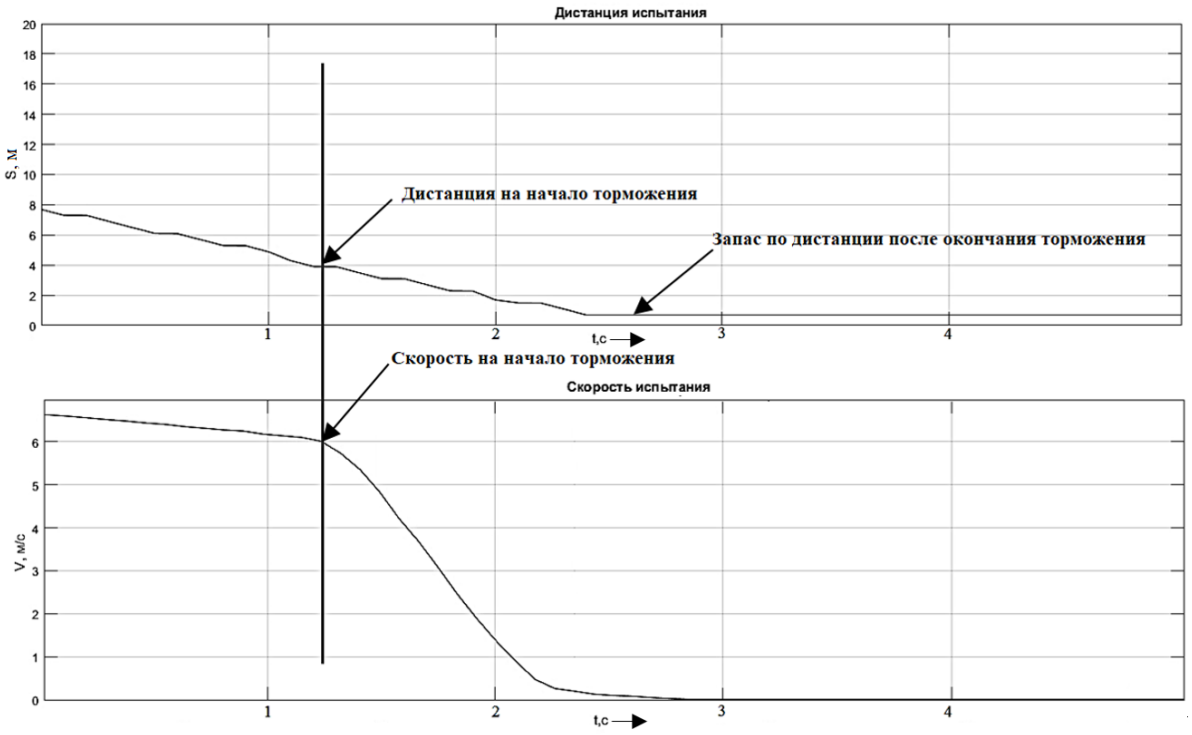


Рисунок 4.3 – Проведение испытаний с учетом поправочных коэффициентов на сухом асфальте

По результатам проведенного испытания были получены следующие значения параметров:

– Дистанция на начало торможения S = 4 метра.

– Дистанция до препятствия после окончания торможения S = 0.6 метра.

По итогам проведения испытания доказано, что расчет тормозного пути по формуле с корректирующими коэффициентами положительно сказывается на работе системы, сократив слишком раннее срабатывание при работе на сухом асфальтированном покрытии.

Проведение оценки эффективности работы САЭТ на мокром асфальте

В качестве расчетной дистанции для начала экстренного торможения использовалась стандартная формула без учета корректирующих коэффициентов.

Погодные условия: Температура окружающего воздуха плюс 10-15 ^{0}С, осадки средней интенсивности.

Дорожное покрытие: мокрый асфальт, без уклона.

Скорость на начало торможения: 5,5 м/с (19,8 км/ч)

На рисунке 4.4 представлены результаты проведения испытания торможения перед неподвижной мишенью на мокром асфальте без учета корректирующих коэффициентов.

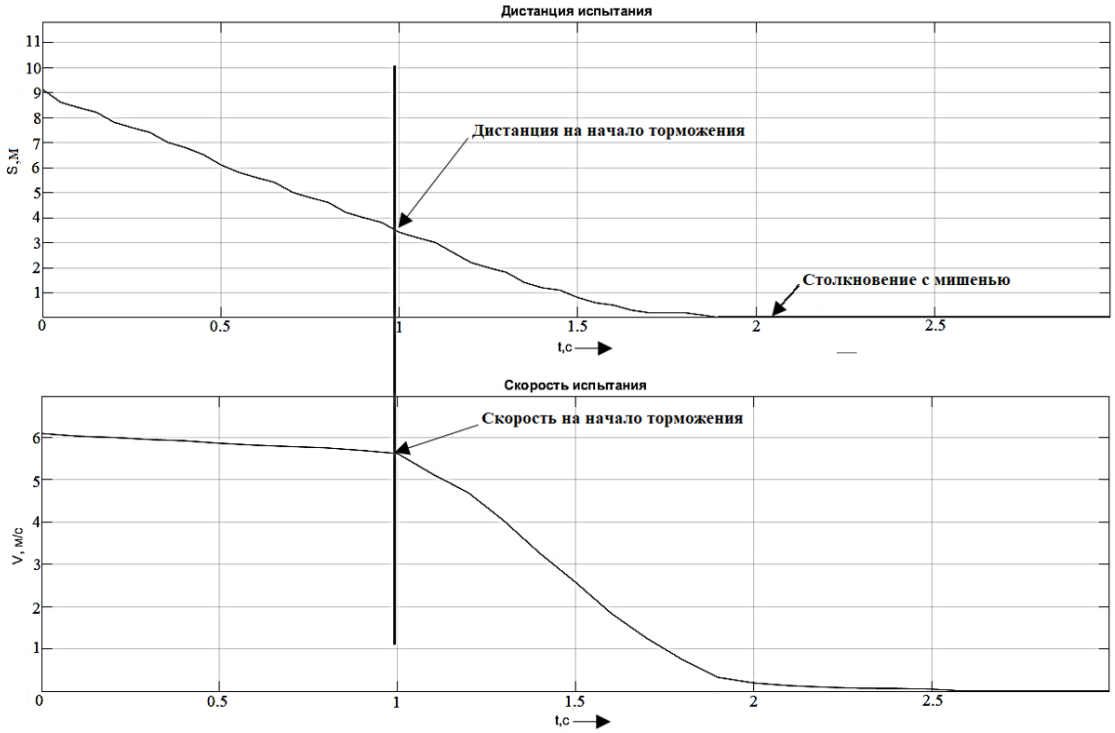


Рисунок 4.4 – Результат проведения испытания без корректирующих коэффициентов

По результатам проведенного испытания были получены следующие значения параметров:

– Дистанция на начало торможения S = 3,6 м.

– Дистанция до препятствия после окончания торможения S = 0 м, столкновение.

В качестве расчетной дистанции для начала экстренного торможения использовалась формула с учетом корректирующих коэффициентов.

Погодные условия: Температура окружающего воздуха плюс 10-15 ^{0}C, осадки средней интенсивности.

Дорожное покрытие: мокрый асфальт, без уклона.

Скорость на начало торможения: 6,5 м/с (23,4 км/ч)

На рисунке 4.5 представлены результаты проведения испытания торможения перед неподвижной мишенью на мокром асфальте с учетом корректирующих коэффициентов

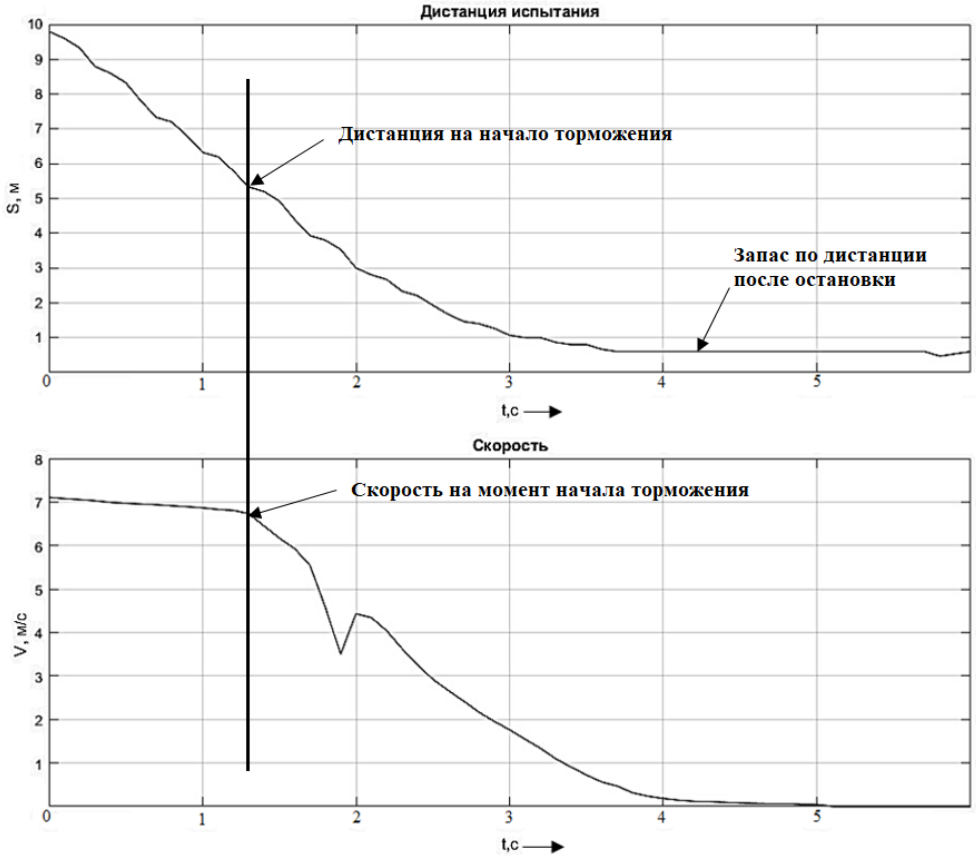


Рисунок 4.5 – Результат проведения испытания с учетом корректирующих коэффициентов на мокром асфальте

По результатам проведенного испытания были получены следующие значения параметров:

- дистанция на начало торможения S = 5,3 м;
- дистанция до препятствия после окончания торможения S = 0,9 м.

По итогам проведения испытания доказано, что расчет тормозного пути по формуле с корректирующими коэффициентами позволяет предотвратить столкновение с мишенью на мокром асфальте. Применение расчета без корректирующих коэффициентов не смогло предотвратить столкновение при испытании на мокром асфальте.

Проведение оценки эффективности работы САЭТ на укатанном снежном покрытии.

В первом случае в качестве расчетной дистанции для начала экстренного торможения использовалась предложенная формула с учетом корректирующих коэффициентов, а во втором стандартная формула расчета без учета корректирующих коэффициентов.

Погодные условия: Температура окружающего воздуха минус 10…15 ^{0}С, осадки отсутствуют.

Дорожное покрытие: укатанный снег, без уклона.

Скорость на начало торможения: 9 м/с (32,4 км/ч)

На рисунке 4.6 представлены результаты проведения испытания торможения перед неподвижной мишенью на укатанном снежном покрытии с учетом корректирующих коэффициентов.

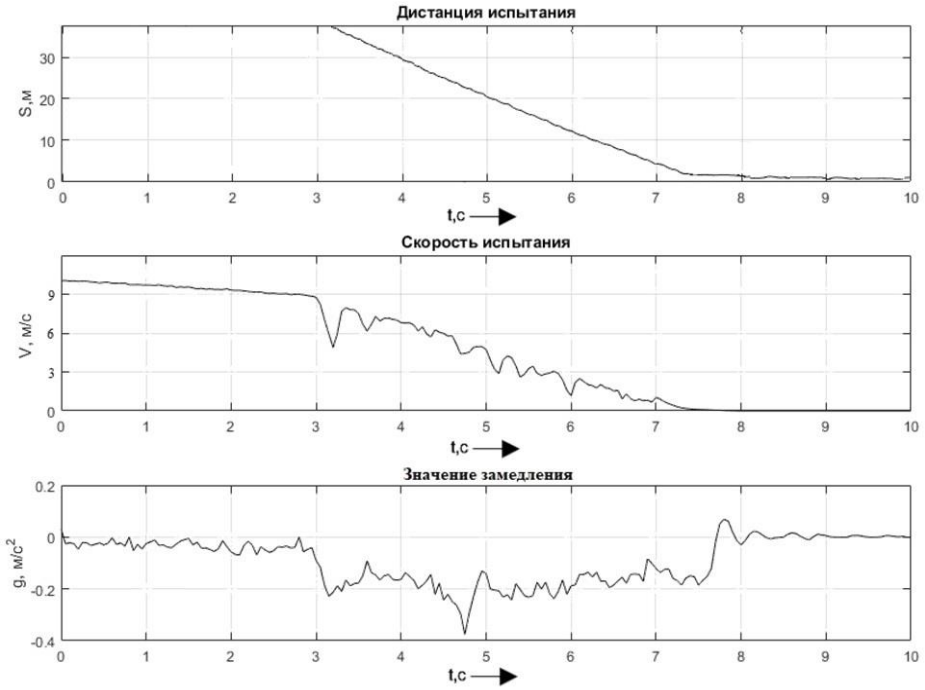


Рисунок 4.6 – Результат проведения испытания с корректирующими коэффициентами

По результатам проведенного испытания на укатанном снежном покрытии с учетом корректирующих коэффициентов были получены следующие значения параметров:

– дистанция на начало торможения S = 42,2 м;
– дистанция до препятствия после окончания торможения S = 1,2 м.

Погодные условия: Температура окружающего воздуха минус 10…15 ^{0}С, осадки отсутствуют.

Дорожное покрытие: укатанный снег, без уклона.

Скорость на начало торможения: 9 м/с (32,4 км/ч)

На рисунке 4.7 представлены результаты проведения испытания торможения перед неподвижной мишенью на укатанном снежном покрытии без учета корректирующих коэффициентов.

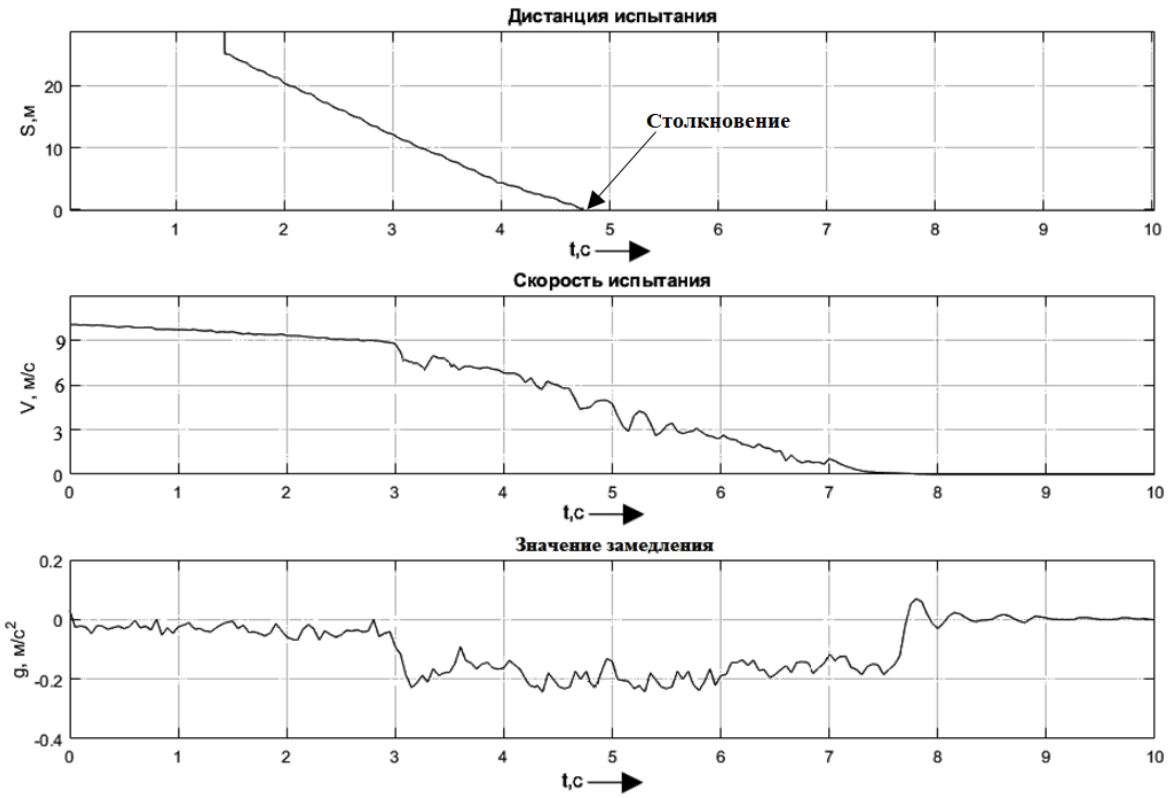


Рисунок 4.7 – Результат проведения испытания без корректирующих коэффициентов

По результатам проведенного испытания на укатанном снежном покрытии без корректирующих коэффициентов были получены следующие значения параметров:

– дистанция на начало торможения S = 12,2 метра.

– дистанция до препятствия после окончания торможения S = 0 метров, столкновение.

По итогам проведения испытаний доказано, что расчет тормозного пути по формуле с корректирующими коэффициентами позволяет предотвратить столкновение с мишенью на укатанном снежном покрытии. Применение расчета без корректирующих коэффициентов не предотвратило столкновение.

4.3 **Проведение функциональных испытаний на эффективность работы разработанной САЭТ за динамической мишенью**

Система автоматического экстренного торможения должна предотвращать потенциальные ДТП в режиме повседневной эксплуатации

автомобиля. Исходя из этого, очевидно, что САЭТ должна адекватно себя показывать во всем диапазоне разрешенного скоростного режима движения. Оценка адекватности работы была проведена в движении в колонне за динамической мишенью. Внешний вид динамической мишени и объекта испытаний приведен на рисунке 4.8.

Рисунок 4.8 – Динамическая мишень и объект испытаний

Погодные условия:

Погодные условия: Температура окружающего воздуха плюс 10-15 ^{0}C, осадки низкой интенсивности.

Дорожное покрытие: мокрый асфальт, без уклона.

Скорость объекта испытаний на начало торможения: 13,8 м/с (50 км/ч)

Скорость динамической мишени: 5,5 м/с (20 км/ч)

На рисунке 4.9 представлены результаты проведения испытаний автоматического экстренного торможения за подвижной мишенью. На графиках представлена дистанция до мишени, скорость объекта испытаний, момент активации предупреждения, момент запроса на активацию торможения.

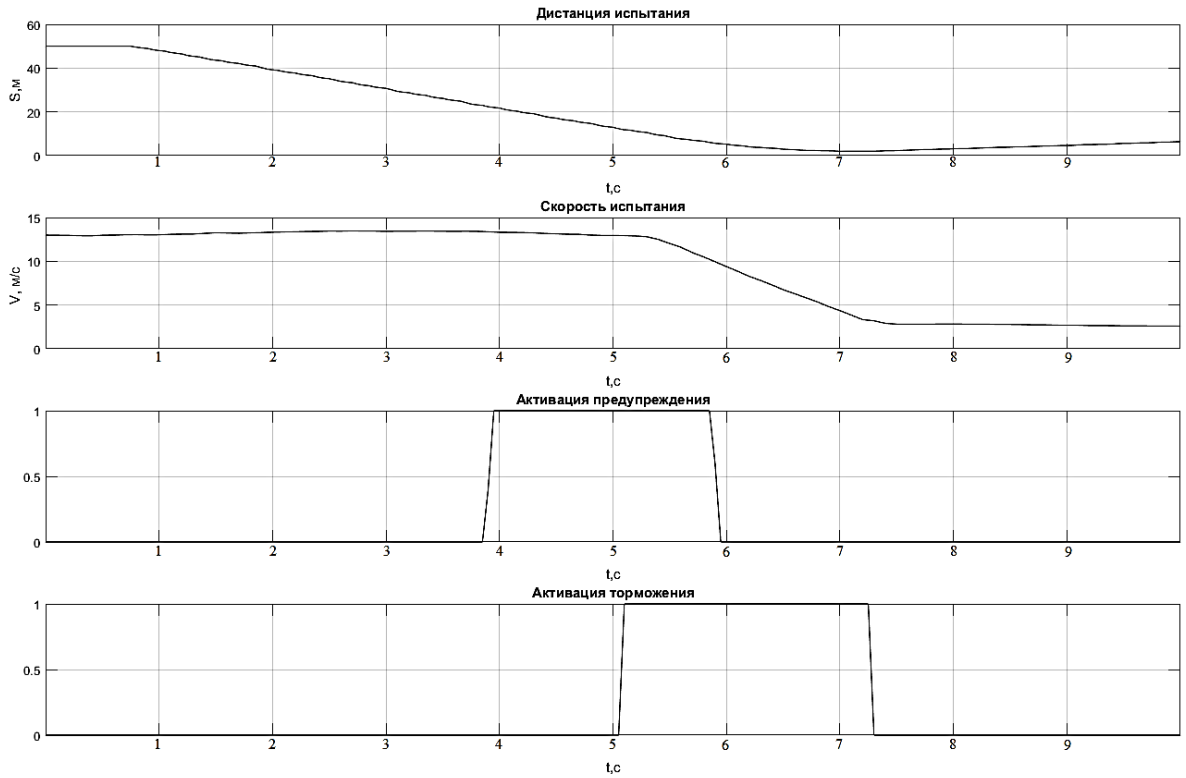


Рисунок 4.9 – Результат проведения испытаний САЭТ за подвижной мишенью

По результатам проведенного испытания были получены следующие значения параметров:

– дистанция срабатывания предупреждения 28 метров;
– дистанция запроса на начало торможения 17 метров;
– дистанция на начало замедления 13 метров;
– дистанция до препятствия после выравнивания скоростей 1.2 метра.

Итогом проведения испытания САЭТ за подвижной мишенью на мокром асфальте доказано, что все этапы работы системы работают в соответствии с предъявляемыми требованиями и позволяют предотвратить столкновение.

Общий список проведенных испытаний представлен в таблицах 37 и 38. В таблице 37 представлены результаты проведения испытаний САЭТ с неподвижной мишенью без учета корректирующих коэффициентов расчета.

Таблица 37 - Результат проведенных испытаний без введения корректирующих коэффициентов САЭТ

№ теста	Скорость, км/ч	Цель, скорость, км/ч	Результат, м
Температура окружающего воздуха: +20; **осадки:** отсутствуют; **покрытие:** сухой асфальтобетон			
1	10	Мягкая мишень, 0	1,7
2	10	Мягкая мишень, 0	1,9
3	10	Мягкая мишень, 0	1,9
4	20	Мягкая мишень, 0	2,1
5	20	Мягкая мишень, 0	2,3
6	20	Мягкая мишень, 0	2,2
7	30	Мягкая мишень, 0	2,3
8	30	Мягкая мишень, 0	2,5
9	30	Мягкая мишень, 0	2,2
Температура окружающего воздуха: +15; **осадки:** низкой интенсивности; **покрытие:** важный асфальтобетон			
1	10	Мягкая мишень, 0	0,5
2	10	Мягкая мишень, 0	0,3
3	10	Мягкая мишень, 0	0,1
4	20	Мягкая мишень, 0	0,1
5	20	Мягкая мишень, 0	Столкновение
6	20	Мягкая мишень, 0	0,1
7	30	Мягкая мишень, 0	Столкновение
8	30	Мягкая мишень, 0	Столкновение
9	30	Мягкая мишень, 0	Столкновение
Температура окружающего воздуха: -20; **осадки:** низкой интенсивности; **покрытие:** укатанный снег			

№ теста	Скорость, км/ч	Цель, скорость, км/ч	Результат, м
1	10	Мягкая мишень, 0	0,1
2	10	Мягкая мишень, 0	Столкновение
3	10	Мягкая мишень, 0	Столкновение
Температура окружающего воздуха: -20; **осадки:** низкой интенсивности; **покрытие:** укатанный снег			
4	20	Мягкая мишень, 0	Столкновение
5	20	Мягкая мишень, 0	Столкновение
6	20	Мягкая мишень, 0	Столкновение

В таблице 36 представлены результаты проведения испытаний САЭТ с неподвижной мишенью с учетом корректирующих коэффициентов расчета.

Таблица 38 - Результат проведенных испытаний с учетом корректирующих коэффициентов САЭТ

№ теста	Скорость, км/ч	Цель, скорость, км/ч	Результат, м
Температура окружающего воздуха: +20; **осадки:** отсутствуют; **покрытие:** сухой асфальтобетон			
1	10	Мягкая мишень, 0	0,5
2	10	Мягкая мишень, 0	0,5
3	10	Мягкая мишень, 0	0,5
4	20	Мягкая мишень, 0	0,6
5	20	Мягкая мишень, 0	0,7
6	20	Мягкая мишень, 0	0,8
7	30	Мягкая мишень, 0	0,9
8	30	Мягкая мишень, 0	1
9	30	Мягкая мишень, 0	1,1

№ теста	Скорость, км/ч	Цель, скорость, км/ч	Результат, м
Температура окружающего воздуха: +20; **осадки:** низкой интенсивности; **покрытие:** важный асфальтобетон			
1	10	Мягкая мишень, 0	0,7
2	10	Мягкая мишень, 0	0,5
3	10	Мягкая мишень, 0	0,6
4	20	Мягкая мишень, 0	1,1
5	20	Мягкая мишень, 0	0,9
6	20	Мягкая мишень, 0	1
7	30	Мягкая мишень, 0	0,9
8	30	Мягкая мишень, 0	1,1
9	30	Мягкая мишень, 0	0,8
Температура окружающего воздуха: -15; **осадки:** низкой интенсивности; **покрытие:** укатанный снег			
1	10	Мягкая мишень, 0	0,5
2	10	Мягкая мишень, 0	0,6
3	10	Мягкая мишень, 0	0,8
4	20	Мягкая мишень, 0	0,5
5	20	Мягкая мишень, 0	0,7
6	20	Мягкая мишень, 0	0,8

В таблице 39 представлены результаты проведения испытаний разработанной САЭТ за подвижной мягкой мишенью

Таблица 39 – Результаты проведения испытаний САЭТ за подвижной мишенью

№ теста	Скорость, км/ч	Цель, скорость, км/ч	Результат, м
Температура окружающего воздуха: +20; **осадки:** низкой интенсивности; **покрытие:** важный асфальтобетон			
1	20	Мягкая мишень, 10	0,5
2	30	Мягкая мишень, 10	0,5
3	40	Мягкая мишень, 10	0,6
4	30	Мягкая мишень, 20	0,7
5	40	Мягкая мишень, 20	0,9
6	50	Мягкая мишень, 20	1,2
7	50	Мягкая мишень, 30	1
8	60	Мягкая мишень, 30	1
9	70	Мягкая мишень, 30	1,1

По итогам проведения испытаний доказана эффективность применения разработанного алгоритма расчета, учитывающего корректирующие коэффициенты для функционирования САЭТ, применение которой позволяет предотвратить столкновение с мишенью при движении в различных дорожно-климатических условиях. Формула, используемая в расчетах, имеет вид:

$$S_{т}^{'} = V_{ср} * (t_{з} * k_{з} + t_{пр} * k_{пр} + \frac{1}{2} t_{н} * k_{н}) + \frac{K_{э} V_{ср}^{2}}{2\varphi_{р} g}. \quad (35)$$

$V_{ср}$– скорость на момент срабатывания торможения;

$k_{пр} = f(K_{э})$ – зависит от конструктивных особенностей тормозной системы, связан с коэффициентом эффективности тормозного привода;

$k_{н} = f(\varphi)$- зависит от текущего коэффициента сцепления;

$k_{з} = f(V)$ –зависит от скорости начала торможения;

$\varphi_{р}$ – прогнозируемый коэффициент сцепления;

$K_{э}$ – коэффициент эффективности тормозной системы.

4.4 Дорожные испытания разработанной САЭТ (испытания в сложных дорожно-климатических условиях)

Для исследования работы САЭТ в условиях повседневной эксплуатации были проведены дорожные испытания в сложных дорожно-климатических условиях. Для этого был проделан испытательный заезд на автомобиле, оборудованном полным набором САЭТ и регистрирующим оборудованием по маршруту г. Ноябрьск – г.Москва. Маршрут движения представлен на рисунке 4.10, фрагмент записи данных с фронтальной камеры распознавания объектов представлен на рисунке 4.11. Протяженность пройденного маршрута составила более 3700 км.

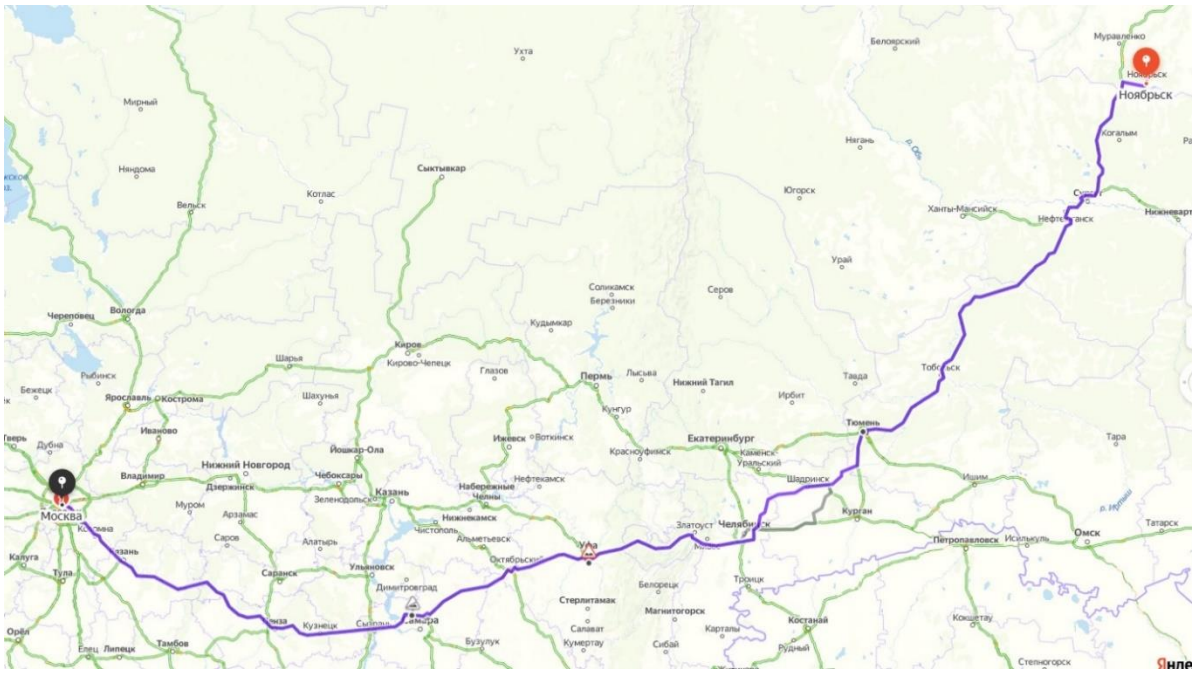


Рисунок 4.10 – Маршрут движения пробеговых испытаний в сложных дорожно-климатических условиях

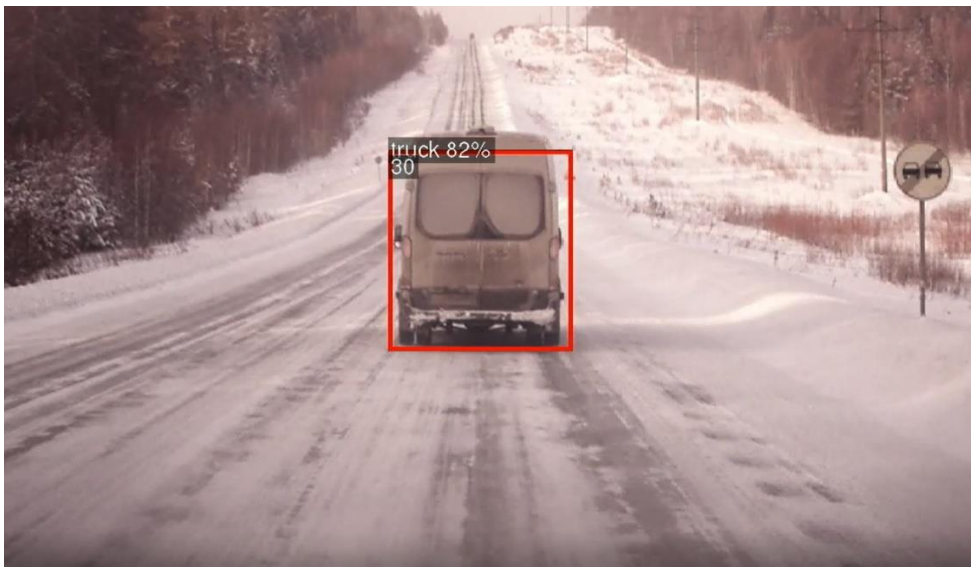


Рисунок 4.11 – Пример фрагмента записи данных с камеры распознавания объектов

В ходе движения была произведена проверка работы системы в условиях плохой видимости, заснеженного дорожного полотна, низкой температуры окружающего воздуха.

Также была произведена проверка работы радарного сенсора в случае загрязнения бампера. Пример состояния загрязнения бампера показан на рисунке 4.12.

Рисунок 4.12 – Пример загрязнения области установки радара

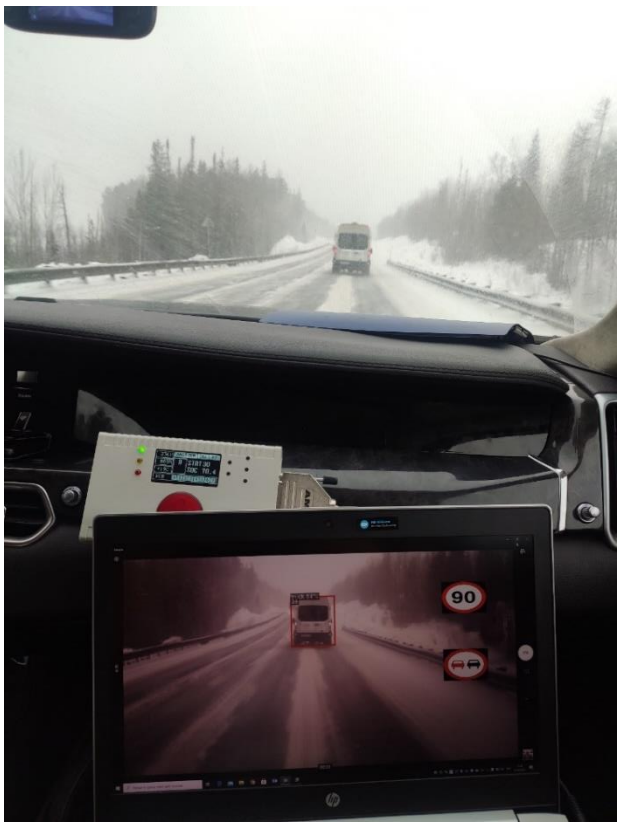


Рисунок 4.13 – Фрагмент записи проведения испытаний по маршруту Ноябрьск – Москва

По итогам проведения дорожных испытаний системы автоматического экстренного торможения в сложных дорожно-климатических условиях получены результаты, показывающие способность функционирования полученного алгоритма без критических ухудшений. Всего на объекте испытаний было пройдено более 10 000 км перед внедрением разработок в серийную установку.

4.5 **Рекомендации по построению математической модели системы автоматического экстренного торможения**

В разработке математической модели в данной работе применялся метод нахождения компромисса и оптимального подхода к детальности проработки отдельных фрагментов создаваемой математической модели.

Из полученных результатов математического моделирования, описанного во второй главе данной работы был сформирован набор необходимых составных частей математической модели, необходимых для

получения наиболее достоверных результатов при моделировании работы системы автоматического экстренного торможения.

Общая математическая модель должна включать следующие части:

– математическую модель движения автомобилей в колонне;

– математическую модель работы применяемой сенсорной аппаратуры;

– математическую модель работы тормозного привода испытуемого ТС;

– математическую модель работы алгоритма функционирования системы автоматического экстренного торможения.

При нахождении решения степени проработки математической модели с целью упрощения разработки, при этом достижения максимально точного результата моделирования, были применены следующие решения:

- математическая модель движения автомобилей в колонне должна быть построена по принципу систем обратной связи. Измерение положения между транспортными средствами должно динамически меняться в результате входных данных по изменению скорости и ускорений в моделируемых режимах движения. При этом детальность проработки математической модели лидирующего транспортного средства не важна, поскольку принимается, что дорожно-климатические условия движения и максимально возможное значение замедление для всех транспортных средств имеет одинаковое значение;

- математическая модель работы применяемой сенсорной аппаратуры должна включать в себя работу имитации значений параметров сенсоров и датчиков, участвующих в работе системы. Детальную проработку следует уделить сенсорам, отвечающим за распознавание объектов и определение дистанции. Применяемые сенсоры (радары, лидары, камеры распознавания объектов и т.д.) имеют различную точность, дискретизацию, задержку передаваемой информации. При пересчете тормозного пути

автомобиля в режиме работы САЭТ необходимо учитывать особенности применяемых сенсоров для учета параметров корректировки пересчета тормозного пути;

- **математическая модель работы тормозного привода** должна включать в себя характеристику работы тормозного механизма, установленного на исследуемом ТС. В зависимости от функционала активной безопасности установленной тормозной системы должна учитываться специфика отработки включения тормозного привода, задержки на достижение установившегося замедления, работу тормозного привода с учетом включения антиблокировочной системы в режиме автоматического экстренного торможения;

- **математическая модель работы алгоритма функционирования системы автоматического экстренного торможения** должна включать в себя обработку всех используемых входных сигналов сенсорной аппаратуры, общую математическую модель торможения автомобиля, все поправки, применимые к расчету тормозного пути в зависимости от условий моделирования движения.

4.6 **Конструктивные рекомендации по повышению эффективности функционирования систем автоматического экстренного торможения**

В данном пункте работы будут рассмотрены особенности конструкции ТС и состав системы автоматического экстренного торможения, способные повысить эффективность ее работы.

Рекомендации использования сенсоров обнаружения объектов

Для выбора сенсорной аппаратуры, необходимо знать об их плюсах и минусах, особенностях использования, эксплуатации и технические характеристики. Как правило, для работы системы автоматического экстренного торможения применяют не один отдельный сенсор, а комбинацию сенсорной аппаратуры.

Как правило, в комбинации датчиков систем интеллектуальной помощи водителю используют радиолокационные сенсоры в комбинации с видеокамерами распознавания объектов. Комбинация сенсоров выбирается в зависимости от характеристик, позволяющих дополнить друг друга и повысить эффективность.

Радар имеет высокую дальность действия, высокую точность расчета дистанции до объекта, способен сохранять работоспособность в сложных дорожно-климатических условиях. К минусам можно отнести возможное распознавание ложных объектов, ошибки классификации типов распознанных объектов.

Камера распознавания объектов имеет невысокую дальность действия, и низкую эффективность в сложных дорожно-климатических условиях, но высокую точность в классификации распознанных объектов, а также возможность распознавать дорожные знаки, линии разметки.

Рекомендации по функционалу установленной тормозной системы

Как было описано в пункте 3.6 данной работы, различные типы тормозных систем отличаются эффективностью работы, доступным функционалом и предустановленными системами активной безопасности, обеспечивающими помощь при торможении.

Ниже представлен список и описание функций тормозной системы, которые могут быть использованы в качестве повышения эффективности функционирования САЭТ:

1. **Антиблокировочная система тормозов.** Предназначена для предотвращения блокировки колёс при торможении посредствам управления давлением рабочего тела в рабочей тормозной системе, что даёт возможность реализации максимального замедления с сохранением возможности управления автомобилем.
2. **Антипробуксовочная система.** Предназначена для предотвращения проскальзывания колёс при подведении к ним избыточного момента

двигателя посредствам нагнетания рабочего тела в тормозных механизмах и/или ограничения момента двигателя.

3. **Система контроля динамики автомобиля.** Предназначена для обеспечения управляемости и устойчивости автомобиля при экстренных режимах движения.
4. **Система помощи при торможении.** Предназначена для увеличения замедления автомобиля посредствам нагнетания дополнительного рабочего тела в рабочей тормозной системе в случае экстренного торможения.
5. **Система очистки тормозов.** Предназначена для очищения тормозных дисков от влаги при движении во влажных условиях посредствам нагнетания давления рабочего в тормозной системе.
6. **Система предварительного заполнения тормозных механизмов.** Предназначена для компенсации времени запаздывания, связанных с преодолением зазора при перемещении всех деталей привода тормозных накладок.

Наличие вышеперечисленных систем в комплектации установленной тормозной системы транспортного средства позволяет повысить эффективность САЭТ посредством сокращения тормозного пути автомобиля.

4.7 **Экономическая оценка предлагаемых решений**

Для проведения анализа и подсчета затрат и по мерам повышения безопасности дорожного движения путем интеграции системы автоматического экстренного торможения в состав автомобиля, статистические показатели ущерба необходимо перевести в денежное выражение. Для расчета берутся средние затраты, возникающие при возникновении происшествий.

Смета затрат ДТП включает в себя:

1) расходы на лечение, включая амбулаторное и стационарное лечение, а также транспортировку раненых;

2) расходы на реабилитацию, включая специальное обучение детей, санаторную реабилитацию и переоборудование жилья;

3) недополученная продукция, включая постоянные расходы в связи с гибелью людей или постоянной нетрудоспособностью, а также временные расходы;

4) потеря благополучия, включая боль и страдания, т. е. потеря благополучия, понимаемого в возможно более широком смысле;

5) повреждение имущества, включая, главным образом, ремонт и замену автомобилей;

6) административные расходы, включая расходы на полицейское расследование, организацию выплаты страховки и судебные издержки;

7) прочие расходы, включая, например, потерю времени в связи с происшествием (когда задерживается дорожное движение).

Итоговый социально-экономический ущерб рассчитывается из прямых потерь + упущенных выгод.

Прямые потери за временной промежуток t - это произведение количества человек, погибших в ДТП за данный временной период, и средних расходов на ритуальные услуги в региональном разрезе и размера компенсационных выплат нетрудоспособным членам семьи по причине потери кормильца:

$$C(d)_t = N(d)_t * (b + r), \quad (36)$$

где

$C(d)_t$ – прямые потери от ДТП за временной промежуток t;

$N(d)_t$- количество погибших от ДТП за временной промежуток t;

b – средние расходы на ритуальные услуги;

r - компенсационные выплаты пострадавшим.

Упущенные выгоды рассчитываются из количества раненых в ДТП в региональном разрезе, и рассчитывается по следующей формуле:

$$B(tr) = \sum_{q=1}^{n} N(wm) * R(tr)_q * E(tr)_q + \sum_{q=1}^{n} N(wf) * R(tr)_q * E(tr)_q, \quad (37)$$

где

$B(tr)$ – упущенные выгоды, полученные в результате ДТП;

$N(wm)$- количество мужчин, пострадавших в ДТП;

$N(wf)$ - количество женщин, пострадавших в ДТП;

$E(tr)_q$ – средние доходы;

$R(tr)_q$ – средний реабилитационный период в случае получения тяжелой травмы.

При проведении общих подсчетов экономического ущерба получаются результаты, приведенные в таблице

Таблица 40 – Экономический ущерб от ДТП за 2020 год

Тип полученных травм	Число пострадавших	Итоговый социально-экономический ущерб млн. руб
Погибшие	16 000	141 200
Инвалидизированные	42 000	225 400
Раненые	117 000	98 600
Итоговый ущерб	175 000	465 200

Показатель экономической выгоды будет рассчитываться как отношение экономического ущерба за год к затратам на реализацию установки системы автоматического экстренного торможения на количество проданных новых автомобилей.

Среднее удорожание автомобиля в серийном производстве при установке системы автоматического экстренного торможения составляет в среднем 120 000 рублей (в зависимости от марки авто цены могут варьироваться).

Система автоматического экстренного торможения способна предотвратить более 50 % случившихся ДТП. При подсчете расходов на 1

пострадавшего в среднем 2 400 000 рублей, то экономическая выгода за каждое предотвращенное ДТП:

$$V = 2\,400\,000 - 120\,000 = 2\,280\,000 \text{ рублей.}$$

Итогом данного расчета является, что средняя экономическая выгода за 1 предотвращенное ДТП в 20 раз превосходит затраты на установку САЭТ.

4.8 **Выводы по Главе 4**

1. Выбраны методика и комплекс измерительно-регистрирующей аппаратуры, позволяющие провести натурный эксперимент, который можно признать воспроизводимым по всем регистрировавшимся параметрам во всех вариантах испытаний на уровне не ниже P = 0,95.

2. Доказана эффективность применения разработанных математических моделей имитации данных сенсорно-датчиковой аппаратуры и моделирования работы тормозного привода в процессе автоматического экстренного торможения, которые позволяют превентивно уточнить характеристику динамики торможения и уточнить прогнозируемый тормозной путь в процессе работы системы автоматического экстренного торможения.

3. Проведена экспериментальная оценка эффективности функционирования системы автоматического экстренного торможения с адаптивным алгоритмом работы и корректировки времени предупреждения о столкновении, которая показала улучшение уровня эффективности функционирования системы автоматического экстренного торможения на поверхностях с низким коэффициентом сцепления, в отличие от применения стандартного алгоритма функционирования системы автоматического экстренного торможения.

4. На основе выполненных экспериментальных исследований составлены рекомендательные методики по разработке математической модели системы автоматического экстренного торможения, описаны конструктивные

рекомендации по повышению эффективности функционирования систем автоматического экстренного торможения.

5. Проведена технико-экономическая оценка. По итогам оценки было получено, что средняя экономическая выгода за 1 предотвращенное ДТП в 20 раз превосходит затраты на установку САЭТ.

Заключение

1. На основе проведенного исследования в данной работе решена задача синтеза адаптивного алгоритма функционирования системы автоматического экстренного торможения и разработки средств его реализации, позволяющая повысить безопасность автомобилей в сложных дорожно-климатических условиях, которая имеет важное значение для распространения систем активной безопасности колесных машин, эксплуатирующихся в дорожных условиях, характерных для Российской Федерации.

При решении этой задачи было выполнено:

– разработана уточненная математическая модель функционирования системы автоматического экстренного торможения, учитывающая сценарии поведения автомобиля-лидера, функционирование сенсорно-аппаратной части, конфигурацию систем активной безопасности автомобиля, позволяющая на стадии проектирования синтезировать рациональную конфигурацию системы автоматического экстренного торможения и алгоритм ее функционирования.

– разработана математическая модель имитации различных дорожных сценариев, основанная на собранной статистике поведения водителей на дорогах общего пользования. На основе статистического исследования были установлены диапазоны замедлений автомобиля-лидера в различных режимах движения, которые были применены к калибровкам САЭТ в виртуальной среде для максимального приближения имитационного моделирования к действительному.

2. Установлено, что на величину тормозного пути существенно влияют конфигурация систем активной безопасности (конфигурация и алгоритмы работы АБС, наличие систем предварительного заполнения в тормозном контуре и т.п.). При проведении испытаний были получены результаты, подтверждающие, что время срабатывания тормозного привода автомобиля категории М1 с гидравлической тормозной системой может быть сокращено

до 36 % за счет включения в конфигурацию систем активной безопасности функционала предварительного заполнения, просушки тормозного механизма, системы увеличения давления тормозной магистрали при недостаточном усилии торможения, применяемого водителем. На основе модели предложена уточненная зависимость для определения остановочного пути автомобиля, отличающаяся от известных наличием поправочных коэффициентов на время срабатывания тормозного привода, время на достижение установившегося замедления, позволяющая прогнозировать точность тормозного пути автомобиля на дорожных покрытиях с различными значениями коэффициентов сцепления с погрешностью не более 10 %.

3. Синтезирован адаптивный алгоритм функционирования системы автоматического экстренного торможения и разработаны средства его реализации. В части разработки математической модели был применен метод исследования, основанный на модели поведения автомобиля лидера, прогнозировании времени реакции водителя, прогнозировании коэффициента сцепления. Методика прогнозирования коэффициента сцепления сформирована на основе принципов нечеткой логики. В качестве переменных для реализации нечеткого контроллера обосновано использование датчика температуры, датчика интенсивности осадков, информация срабатывания антиблокировочной системы автомобиля, системы курсовой устойчивости, системы распознавания линий дорожной разметки.

4. Экспериментальными исследованиями на одном из прототипов автомобилей проекта ЕМП Aurus Senat с установленной системой автоматического экстренного торможения, включающей в себя адаптивный алгоритм функционирования системы автоматического экстренного торможения, были проведены испытания на полигоне НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ», а также испытания на дорогах общего пользования.

В ходе проведения эксперимента была подтверждена достоверность прогнозирования коэффициента сцепления, расчета времени срабатывания тормозного привода, определение времени достижения установившегося

замедления и расчет общего тормозного пути в сложных дорожно-климатических условиях.

При этом получена удовлетворительная сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований. Применимость математической модели подтверждается относительной погрешность моделирования, не превышающей 10 %, что является допустимым значением в расчетах, учитывая специфику функционирования системы.

5. Разработана методика построения математической модели системы автоматического экстренного торможения для различных конфигураций систем активной безопасности. Получены практические рекомендации, а также конструктивные рекомендации по повышению эффективности функционирования системы.

6. Проведение технико-экономической оценки подтвердило целесообразность и экономическую выгоду внедрения системы автоматического экстренного торможения. По итогам оценки было получено, что средняя экономическая выгода за 1 предотвращенное ДТП в 20 раз превосходит затраты на установку 1 комплекта системы автоматического экстренного торможения.

7. Результаты, полученные в диссертационной работе, в дальнейшем могут быть использованы для разработки систем автоматического экстренного торможения, способных показывать высокую эффективность работы в регионах со сложными дорожно-климатическими условиями.

Список литературы

1. Оснащённость населения автомобилями. Прогнозы роста. Режим доступа: https://www.autonews.ru/news/5c9114d69a7947491f827 [дата обращения 21.05.2019]

2. Статистика дорожно-транспортных происшествий за 2017-2020 год Режим доступа: http//stat.gibdd.ru [дата обращения 21.11.2020]

3. Системы безопасности автомобиля. Режим доступа: http://autodriving.net/kuzov-i-sistemy-bezopasnosti-avtomobilya/ [дата обращения 22.07.2019].

4. AEBS Mercedes-benc. Режим доступа: https://www.mercedes-benz.ru/passengercars/mercedes-benz cars/models/eqs/saloonv297/explore/wallbox-sales.module.html/ [дата обращения 22.07.2019].

5. Electronic Stability Program and Road Safety. Режим доступа: https://www.arrivealive.mobi/electronic-stability-program-and-road-safety/ [дата обращения 15.05.2019].

6. NHTSA: сайт компании. Режим доступа: http://autobrestkvn.narod.ru/el_brake.htm/ [дата обращения 22.07.2019].

7. Искусственный интеллект в автомобилях. Режим доступа: https://center2m.ru/ymnie-avtomobili/ [дата обращения 18.03.2020].

8. Driver Support Systems, Volvo: сайт компании. Режим доступа: http://www.volvotrucks.co.uk/en-gb/trucks/volvo-fh-series/features/driver-support-systems.html. [дата обращения 03.12.2019].

9. Autonomous Emergency Braking, Euro NCAP: сайт компании. Режим доступа://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-rewards-explained/

autonomous-emergency-braking/ [дата обращения 25.01.2020].

10. General Safety Regulation (GSR) and Commercial Vehicles. Режим доступа: https://www.zf.com/products/en/cv/campaigns/gsr.html/ [дата обращения 25.09.2021]

11. Правила ЕЭК ООН № 131. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения механических транспортных средств категорий M, N и O в отношении торможения. Режим доступа: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/ main/wp29/wp29regs/r013r6r.pdf

12. Правила ЕЭК ООН N 152 Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения автотранспортных средств в отношении систем автоматического экстренного торможения (САЭТ) для транспортных средств категорий M(1) и N(1) . Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/565385261/ [дата обращения 25.09.2021]

13. Automatic emergency braking systems (AEBS). Режим доступа: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2009/wp29grrf/AEBS LDW-01-06e.pdf

14. EuroNCAP: сайт компании. Режим доступа: https://www.nhtsa.gov/ratings/[дата обращения 22.07.2020]

15. EuroNCAP: сайт компании. Режим доступа: https://www.nhtsa.gov/press-releases/nhtsa-announces-update-historic-aeb-commitment-20-automakers/ [дата обращения 23.07.2020]

16. EuroNCAP: сайт компании. Режим доступа: https://www.euroncap.com/en/for-engineers/ [дата обращения 25.07.2020]

17. Общая статистика ДТП по годам . Режим доступа:https://fleet-safety.org/proekty/statistika-dtp#!/tab/191532971-1/[дата обращения 22.07.2020]

18. Принцип работы системы САЭТ от компании Volvo City Safe. – URL: https:// www.media.volvocars.com/ru/ruru/media/pressreleases/154717/city-safety-volvo-cars-xc90/ [дата обращения 22.07.2020]

19. Mercedes-Benz Pro Training: Tip on the Advanced Emergency Braking System (AEBS).Режим доступа: https://roadstars.mercedes-benz-trucks.com/ [дата обращения 22.07.2020]

20. FORWARD EMERGENCY BRAKING. Режим доступа: https://www.infinitiusa.com/infiniti-news/technology/forward-emergency-braking.html/ [дата обращения 16.05.2020]

21. Бабков В. Ф. Дорожные условия и безопасность движения/ Москва. Транспорт, 1993 г.

22. Теория эксплуатации автомобильных дорог/ Васильев А. П., Дингес Э. В., Добров Э. М./ Учебное пособие - Кнорус, 2021 г.

23. Исследование влияния погодных условий на коэффициент сцепления шин с дорогой/ Ботвинева Н.Ю., Буракова И.С., Стрельцова Т.Н., Нестерчук А.В. / Фундаментальные исследования. – 2013. – № 11-3. – С. 407-411;

24. Евтюков С.А. Влияние факторов на сцепные качества покрытий автомобильных дорог // Современные проблемы науки и образования. – 2012.

25. Системы помощи водителю: тенденции и перспективы, Bosch:Сайт компании. Режим доступа: https://abs-magazine.ru/article/analitika-bosch-sistemy-pomoschi-voditeljam-prodolzhajut-aktivno-razvivatsj/ [дата обращения 21.05.2019]

26. Buznikov S. E., 2018. System analysis of vehicle active safety problem. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering Volume 315 (2018), 012005, DOI: 10.1088/1757-899X/315/1/012005.

27. Боровский Б.Е. Безопасность движения автомобильного транспорта /Л.: Лениздат, 1984. – 304 с.

28. Концепция развития систем предупреждения столкновения транспортных средств / В.В. Елистратов, С.И. Безруков, П.Г. Стенин, В.С. Климаков/ Современные проблемы науки и образования. – 2014, №2 – С. 15-20.

29. Кислицкий, Н.М. К вопросу о неравномерности износа шин размера 7.35-14 (185-355) модели И-146. //Автомобильная промышленность, 1976, № 5, с. 26-27

30. Радиолокатор для повышения безопасности автомобиля / Юрчевский А.А., Краснопольский А.З.//Организация автомобильных перевозок и безопасность движения: Труды МАДИ. Вып. 131. СССР, 1977.

31. Ревин А.А. Повышение эффективности, устойчивости и управляемости при торможении автотранспортных средств. //Диссертация, Волгоград 1983г.

32. Влияние условий эксплуатации автомобильных шин на коэффициент сцепления / Пилюшина Г.А., Звонников П.В. / Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. тр.; под общ. ред. Е.А. Памфилова.Брянск, Изд-во БГИТА, 2015. Вып. 21. 122 с.

33. Ахметшин, А.М. Адаптивная антиблокировочная тормозная система колесных машин.// Диссертация 2003г.

34. Гурьянов М.В. Частотный метод оценки курсовой устойчивости автомобиля на основе его моделей в виде систем с многими степенями свободы и нелинейным взаимодействием шин с дорожным покрытием//Диссертация 2007г.

35. Рязанцев В. А. Метод совершенствования управления антиблокировочной системой автомобиля при индивидуальном

регулировании тормозных механизмов //Диссертация, Москва 2019г.

36. Рязанцев В.А., Ахметшин А.М. Метод повышения эффективности тормозного управления колесных машин.// Автомобильная промышленность, 2017, №7, с. 17-20.

37. Бахмутов С.В., Бузников С.Е., Сайкин А.М., Ендачев Д.В. / Перспективы развития беспилотного автотранспорта в дорожно-климатических условиях РФ/Материалы 106-й международной научно-технической конференции /Издательство ИРНИТУ 2019г.

38. Иванов В. Г., Бутылин Г. В., Сяхович В. Э., Широков Б. Н. Об оценке сцепления колеса с дорогой/Белорусский национальный технический университет// издательство «Новые технологии», Подольск, 2004г.

39. Иванов А.М., Кристальный С.Р., Попов Н.В. Системы автоматического экстренного торможения: монография // МАДИ 2018. — 179 с.

40. Топорков М. А. Повышение эффективности действия системы автоматического экстренного торможения автомобиля//Диссертация, Москва 2019г.

41. Effects of forward collision warning technology in different pre-crash scenarios/ Raymond J. Kiefer, Alice Haskins и Jonathan M. Hankey/ Department of Civil, Environmental, and Construction Engineering, University of Central Florida, Orlando, FL 32816-2450, United State 2021

42. Status of test methods for active safety systems/Andres Aparicio, Micha Lesemann, Henrik Eriksson/SAE technical paper 2012-36-0214.

43. Typical Pedestrian Accident Scenarios in China and Crash Severity Mitigation by Autonomous Emergency Braking Systems/ Publication SAE International 2015-01-1464.

44. Noise Filtering in Autonomous Emergency Braking Systems with Sensor Fusions//Ping-Min Hsu, Ming Hung Li, and Kuo-Ching Chang//Automotive Research & Testing Center - Published 04.14.2015

45. Анализ проблемы создания конкурентоспособной системы автоматического экстренного торможения на автомобилях в климатических и дорожных условиях РФ/ В.В. Петин, А.А. Келлер/Материалы 106-й международной научно-технической конференции. Иркутск 2019

46. Design of Autonomous Emergency Braking System Based on Impedance Control for 3-Car Driving Scenario//I-Hsuan Lee and Bi-Cheng Luan //Haitec – Published. SAE Technical Paper 2015-01-1464, 2015.

47. Safety Campaigns EuroNCAP. Режим доступа: https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/ [дата обращения 21.05.2019]

48. Global Vehicle Target test. Режим доступа: https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/safety assist/aeb-car-to-car/ [дата обращения 15.08.2020]

49. TEST PROTOCOL – AEB systems. Режим доступа: /https://cdn.euroncap.com/media/26996/euro-ncap-aeb-c2c-test-protocol-v20.pdf/ Version 2.0, March 2017.

50. Vulnerable Road User (VRU) Protection. Режим доступа: https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/vulnerable-road-user-vru-protection/aeb-pedestrian/ [дата обращения 18.04.2020]

51. EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME (Euro NCAP) Режим доступа: /https://cdn.euroncap.com/media/43381/euro-ncap-aeb-vru-test-protocol-v204.pdf/ [дата обращения 16.09.2020]

52. Road vehicles — Test method to evaluate the performance of autonomous

emergency braking systems. Режим доступа: /https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:22733:-1:ed-1:v1:en/ [дата обращения 18.04.2020]

53. Automatic Emergency Braking Systems (AEBS) Режим доступа: /http://autoengineer.org/assets/files/runcap/runcap_automatic-braking_eng.pdf [дата обращения 19.04.2020]

54. Методика RuNCAP Режим доступа: http://www.autoengineer.org/runcap1/metodika.html. [дата обращения 29.04.2021]

55. Методики тестирования автоматизированных систем управления автомобилем /В.М. Приходько, А.М. Иванов, В.Б. Борисевич, С.С. Шадрин // Вестник МАДИ.-2017.-№4.

56. AEBS на автомобилях среднего и малого класса/ Режим доступа: /https://www.euroncap.com/ru/results/Ford/Focus/10923/ [дата обращения 21.03.2020]

57. Косенков А. Устройство тормозных систем иномарок и отечественных автомобилей/ Ростов н/Д: Феникс, 2003. — 224 с.

58. Чудаков, Е.А. Избранные труды. Т. 1. Теория автомобиля //– М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 464 с

59. Кравец, В.Н. Теория автомобиля / В.Н. Кравец; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2-е изд., переработ. – Н.Новгород, 2013. – 413 с.

60. Исследование сопротивления скольжению автомобильных шин по дорожным покрытиям различной шероховатости: Отчет/МАДИ; Руководитель темы Бабков В.Ф. - № ГР 79025961. – М., 1979.

61. Портнягин Е.М. Метод контроля тормозной эффективности и устойчивости автомобилей с ABS при их диагностировании на роликовых стендах// дис. канд. техн. наук. Оренбург, 2009.

62. Соцков Д.А. Метод расчета регулятора тормозных сил // Владимирский политехнический институт, 1977.

63. Сцепление колеса с дорогой и безопасность движения / Л.С. Стецюк, М.А. Паршин, А.Т. Епифанцев. // – М.: Автотрансиздат, 1963. – 354 с.

64. Степанов И.С., Покровский Ю.Ю., Ломакин В.В., Москалева Ю.Г./ Влияние элементов системы водитель – автомобиль – дорога – среда и безопасность дорожного движения/ Москва, 2011г.

65. Ротенберг, Р.В. Основы надежности системы водитель– автомобиль–дорога–среда/ Машиностроение, 1986. – 216 с.

66. Туманов М.П. Теория управления. Теория линейных систем автоматического управления // Учебное пособие. – МГИЭМ. М., 2005, 82 с.

67. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы: Учебное пособие для вузов. - СПб.: Питер, 2005. - 336 с

68. Чванов, В.В. Методы оценки безопасности дорожного движения, основанные на анализе режимов движения автомобилей // «Дороги и мосты», Сборник ст. / ФГУП РОСДОРНИИ. – М.. 2011, Вып. 26/2. – 243-260 с.

69. Нерсесяк, Л.С. Психологические аспекты повышения надежности управления движущимся объектом //– М. : Промедек, 1992. – 287 с

70. Природа ошибок человека-оператора: на примерах управления транспортными средствами. / М.А. Котик, А.Н. Емельянов.// – М. : Транспорт, 1993. – 256 с.

71. Software tools from Vector, Vector: сайт компании. Режим доступа:

https://www.vector.com/int/en/products/products-a-z/software/canalyzer/ [дата обращения 21.05.2020]

72. System Modeling and Simulation. Режим доступа: /https://www.mathworks.com/solutions/system-design-simulation.html?s_tid=hp_solutions_system/ [дата обращения 21.05.2020]

73. Long Range Radar Sensor 77 GHz. Режим доступа: /https://conti-engineering.com/wp-content/uploads/2020/02/ARS-408-21_EN_HS-1.pdf/ [дата обращения 11.08.2021]

74. Использование в экспертной практике экспериментально-расчетных значений параметров торможения колесных тракторов: методические рекомендации для экспертов. – М.: ВНИИСЭ, 1989. – 6 с.

75. Лазарев Д.А., Новиков И.А. /Установка для измерения коэффициента сцепления заблокированного автомобильного колеса с дорожным покрытием / Сборник трудов XII Международной научно-практической конференции «Организация и безопасность движения в крупных городах» - Санкт-Петербург СпбГАСУ, 2016 г. С. 569-576.

76. Масленников В.Г., Замешаев Н.С. / Методика оперативного определения коэффициента сцепления шин АТС на месте дорожно-транспортного происшествия/ под общ. ред. С.П. Озорнина. – Чита: ЗабГУ, 2016. – С. 208 – 213.

77. Использование прогнозирования коэффициента сцепления шин с опорной поверхностью для повышения эффективности действия опережающих систем экстренного торможения /А. М. Иванов, С. Р. Кристальный, М. А. Топорков // Автомобильная промышленность :ежемес. науч.-техн. журн. - 2018. - N 2. - С. 17-21

78. Petin V.V., Keller A.V./ Modeling the algorithm of the autimatic emergency

braking system with the prediction of the coefficient of tire grip/ В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Automobile Scientific Forum, IASF 2019 "Technologies and Components of Land Intelligent Transport Systems". 2020. С. 012012.

79. Как работает система контроля полосы движения. Режим доступа: https: techautoport.ru/sistemy-bezopasnosti/aktivnaya/sistema-kontrolya-polosy-dvizheniya.html [дата обращения 18.03.2020]

80. Аверкин А.Н. / Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А. Н. Аверкин – М.: Книга по Требованию, 2021. – 312 с.

81. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. – www.exponenta.ru.

82. Бузников С.Е., Елкин Д.С., Шабанов Н.С., Струков В.О. Задача безопасного автоматического торможения беспилотного автомобиля // Труды НАМИ. – 2016. – № 265. – С. 44–52.

83. Рязанцев В.А., Ахметшин А.М. Метод повышения эффективности тормозного управления колесных машин.- Автомобильная промышленность, 2017, №7, с. 17-20.

84. Чванов, В.В. Методы оценки безопасности дорожного движения, основанные на анализе режимов движения автомобилей / «Дороги и мосты», Сборник ст. / ФГУП РОСДОРНИИ. – М.. 2011, Вып. 26/2. – 243-260 с.

85. Philippe P./ Fuzzy logic in spatial modelling/ Scholars" Press 2014

86. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 167 с.

87. Фрумкин А.К., Липай В.В. Аналитическое исследование торможения

автомобильного колеса с АБС.- Исследование торможения автомобиля и работы пневматических шин. - Омск: ОмПИ, 1979. с.41-52.

88. Post, W.; Koch-Dücker, H.-J.; Papert, U. Car braking systems. Antilock braking system. In Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems: Function, Regulation and Components; Reif, K., Ed.; Springer: Friedrichshafen, Germany, 2014; pp. 28–40, 74–94.

89. Топорков М. А./ Повышение эффективности действия системы автоматического экстренного торможения автомобиля/ Диссертация, Москва 2019г.

90. Демидова Г.Л., Лукичев Д.В./ Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами/ СПб: Университет ИТМО, 2017. – 81 с.

91. Гостев В. И./Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления//СПб.: БХВ-Петербург, 2011. - 416 с.

92. Штовба С.Д./Проектирование нечетких систем средствами MATLAB// Москва. Горячая линия - Телеком, 2007. - 288 с

93. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH //СПб: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.

94. Habibur Rahman Md., Habib,Md. Harun-Or- Rashid and Md.Amirul Islam Rony. Fuzzy Logic Controller //LAP Lambert Academic Publishing, 2013.

95. Zadeh L. A. A Fuzzy-Set-Theoretic Interpretation of Linguistic Hedges// Jour. of Cybernetics, 2. pp. 4-34, 1972.

96. Тарасик Владимир. Теория движения автомобиля// Издательство BHV, 2021 г.

97. Комзалов А. М., Шилов Н. Г./ Применение современных технологий в

системах помощи водителю автомобиля // Изв. вузов. Приборостроение., Т. 60, № 11, 2017. С. 1077-1082

98. Теория эксплуатационных свойств автомобиля: учебное пособие // Н.А. Кузьмин, В.И. Песков./ – М. Форум, НИЦ ИНФРАМ, 2013. – 256 с.

99. Electronic stability program (ESP®) - Bosch Mobility Solutions/https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/assistance-systems/automatic-emergency-braking-on-vulnerable-road-users/[электронный ресурс]/(дата обращения 19.03.2021).

100. Hart P. M. Review of Heavy Vehicle Braking Systems Requirements (PBS Requirements), Draft Report, 24 April 2003

101. Novikov I.A. , Lazarev D.A., and Kudinov D.V. The estimation of friction coefficient of vehicle’s blocked wheel given with contact patch of the tread with the road surface International Journal of Applied Engineering Research Vol. 21(2015) pp 42721-42724.

102. Чудакова Н.В. Евтюков С.С./ Применение установившегося замедления транспортного средства в экспертной практике. / Инновации на транспорте в машиностроении./ СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – 2016. – С. 41-45.

103. Долгова Л.А., Василиади Г.Н./Обоснование способа предупреждения столкновения автомобилей / Молодой ученый. – 2015. – № 9. – С. 194–198.

104. Hsu, P., Li, M., and Chang, K., "Noise Filtering in Autonomous Emergency Braking Systems with Sensor Fusions," SAE Technical Paper 2015-01- 0216, 2015, doi:10.4271/2015-01-0216.

105. Дик А.Б. Расчет стационарных и нестационарных характеристик тормозящего колеса при движении с уводом // дис. канд. техн. наук. – Омск.: САДИ, 1988. – 224 с.

106. Приходько В.М., Иванов А.М., Борисевич В.Б., Шадрин С.С. / Методики тестирования автоматизированных систем управления автомобилем / Вестник Московского автомобильно-дорожного технического университета (МАДИ). – 2017. – № 4 (51). – С. 10-15.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (ФГУП «НАМИ»)

ул. Автомоторная, д. 2, г. Москва, 125438
www.nami.ru; e-mail: info@nami.ru
тел.: (495) 456-57-00, факс: (495) 456-31-32

ОКПО 00234703
ОГРН 1027739228406
ИНН/КПП 7711000924/774301001

22 марта 2022 № 2080-04/24

на № _____ от _____

Утверждаю

Заместитель генерального директора ФГУП «НАМИ» по науке, д.т.н., профессор

_____ Бахмутов С.В.

«22» марта 2022

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Результатов диссертационной работы Петина Виктора Викторовича на тему: «Повышение активной безопасности автомобиля на основе синтеза адаптивного алгоритма функционирования системы автоматического экстренного торможения», выполненной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины.

Комиссия в составе председателя – директора центра «Интеллектуальных систем» Евграфова В.В., и членов комиссии – начальника управления «Интеллектуальных автомобилей» Мезенцева Н.П. и заведующего отделом «Интеллектуальных систем помощи водителю» Юрасова А.А. составили настоящий акт о том, что полученные в диссертационной работе Петина В.В. результаты теоретических и экспериментальных исследований, а именно:

- уточненная математическая модель функционирования системы автоматического экстренного торможения,
- технические решения и практические рекомендации по повышению эффективности работы систем автоматического экстренного торможения,

используются в ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» при выполнении работ, связанных с исследованием и разработкой систем интеллектуальной помощи водителю.

Председатель комиссии:

к.т.н., директор центра

Интеллектуальных систем _____ Евграфов В.В

Члены комиссии:

Начальник управления
интеллектуальных автомобилей _____ Мезенцев Н.П.

Заведующий отделом

интеллектуальных систем помощи водителю _____ Юрасов А.А.

129658

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

УТВЕРЖДАЮ
И.о. проректора по научной работе
Московского Политеха
_____ А.Ю. Наливайко
«____» _____ 2022 г

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Петина Виктора Викторовича на тему: «Повышение активной безопасности автомобиля на основе синтеза адаптивного алгоритма функционирования системы автоматического экстренного торможения», выполненной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

Комиссия в составе председателя –заведующего кафедрой наземные транспортные средства д.т.н., профессора А.В. Келлера, и членов комиссии – профессора кафедры наземные транспортные средства к.т.н., доцента М.Ю. Есеновского и старшего преподавателя кафедры наземные транспортные средства Е.В. Климовой составили настоящий акт о том, что полученные в диссертационной работе В.В. Петина результаты теоретических и экспериментальных исследований, а именно:

- методика построения математической модели системы автоматического экстренного торможения автомобиля для различных конфигураций систем активной безопасности;
- методика прогнозирования коэффициента сцепления колес транспортного средства с опорной поверхностью на основе принципов нечеткой логики,

внедрены в научную деятельность кафедры наземные транспортные средства Московского политехнического университета при выполнении поисковых научно-исследовательских работ, а также в учебный процесс при чтении лекций по курсам: «Теория автомобиля и трактора», «Автоматические системы автомобиля и трактора», «Конструкция автомобиля и трактора», «Испытания автомобиля и трактора», «Математическое моделирование технических систем» и при выполнении выпускных квалификационных работ по образовательным программам «Автомобили и автомобильный сервис», «Инжиниринг и эксплуатация транспортных систем», «Перспективные транспортные средства».

Председатель комиссии:
Д.т.н., профессор — А.В. Келлер

Члены комиссии:
К.т.н., доцент — М.Ю.Есеновский
Е.В. Климова