

На правах рукописи

Вассуф Язан

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОМОЩИ ВОДИТЕЛЮ
ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА**

Специальность 2.5.4 - Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2026

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

Научный руководитель: **Серебрянный Владимир Валерьевич**, к.т.н, доцент, заведующий кафедрой «Робототехнические системы и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Манько Сергей Викторович**, д.т.н., профессор, профессор кафедры проблем управления ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет»

Алхатиб Маджи, к.т.н., инженер программист отдела электроники и автоматики ООО «Рентген-Комплект»

Ведущая организация: ГНЦ РФ ФГУП «Научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт» (НАМИ)

Защита состоится 09 июня 2026 года в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.14 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., д.10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <https://www.bmstu.ru/>.

Отзывы и замечания на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.331.14

кандидат технических наук

Глазков Виталий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современных условиях внедрение интеллектуальных систем помощи водителю (ИСПВ) (ADAS, Advanced Driver Assistance Systems) и беспилотных технологий для общественного транспорта, такого как автобусы и электробусы, становится особенно актуальным. Эти системы призваны повысить безопасность, комфорт и эффективность транспортных средств, ежедневно перевозящих тысячи пассажиров.

Общественный транспорт играет ключевую роль в обеспечении устойчивого городского движения, но его эксплуатация сопряжена с рядом вызовов: сложные дорожные условия, интенсивное движение, человеческие ошибки водителей, а также необходимость обеспечения безопасности пассажиров и других участников дорожного движения. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно дорожно-транспортные происшествия, значительная часть которых связана с общественным транспортом, уносят миллионы жизней.

Применение интеллектуальных систем, которые включают в себя радары, камеры, алгоритмы машинного обучения и методы управления, способно снизить аварийность за счёт точного распознавания объектов, прогнозирования опасных ситуаций и своевременного принятия решений.

Таким образом, разработка и внедрение ИСПВ для автобусов и электробусов является актуальной задачей, направленной на повышение безопасности, комфорта пассажиров и эффективности эксплуатации транспортных средств.

Степень научной разработанности темы исследования. Под термином «безопасность» транспортного средства (ТС) понимается не только его состояние, при котором обеспечивается предотвращение столкновений с объектами внешней среды, но и одновременно учет уровня комфорта пассажиров в процессе движения.

В мире ведутся активные разработки ИСПВ. Исследования **Sebastian Thrun** и **Jose A. Lazaro** демонстрируют преимущества комбинации радаров (надежность в плохую погоду) и камер (точная классификация). Задачи их интеграции решаются в работах **Sanju Kumar NT, Luis Miguel Bergasa, Nalini Chandrashekar Iyer**, где применяются фильтры Калмана (ФК) и алгоритмы глубокого обучения для комплексирования данных датчиков.

Актуальной является задача адаптивного управления скоростью. В исследованиях **Birsen Donmez, Mustafa Bahattin Celik, Josep Ma. Fàbrega, Zhigen Nie** для этого используются методы адаптивного и предиктивного управления, учитывающие изменения массы ТС и дорожных условий.

В России разработки для общественного транспорта, учитывающие сложные дорожные и климатические условия, ведутся в работах **Макарова В.С., Торшина А.А., Жилейкина М.М.** Моделирование поведения ТС и повышение точности распознавания объектов исследуются в МАДИ, КАМАЗ, СберАвтоТех, НАМИ. Общие вопросы безопасности в сложных

системах рассматриваются в работах Яковлева Д.С., Зенкевича С.Л., Михайлова Б.Б., Носкова В.П.

Дополнительно к степени научной разработанности темы следует отметить, что существующие базовые архитектуры ИСПВ и автономных систем (**Stanley, Apollo**) ориентированы на расширенный сенсорный состав и распределённые блоки управления, что повышает информативность, но усложняет интеграцию и увеличивает стоимость системы. При этом вопросы интеграции управления подвеской в общую архитектуру ИСПВ с использованием ограниченного набора сенсоров (радары и камеры) в настоящее время остаются недостаточно проработанными, что подтверждает актуальность и научную новизну настоящего исследования.

Анализ существующих вышеперечисленных исследований, включая работы зарубежных и российских ученых, показал необходимость разработки комплексных решений, которые обеспечивают не только безопасность, но и комфорт пассажиров в общественном транспорте. В данной работе рассматриваются подходы, которые требуют дальнейшей разработки и внедрения: использование комбинации радаров и камер без лидаров, разработка системы повышения точности данных предлагаемых датчиков, управление скоростью в условиях неопределенности и управление комфортом пассажиров во время движения.

Объектом исследования является общественный транспорт, в частности автобусы и электробусы, оснащённые ИСПВ.

Предметом исследования является ИСПВ, которая применяется в автобусах и электробусах и направлена на повышение безопасности, эффективности и комфорта пассажиров.

Целью диссертационной работы является повышение уровня безопасности при одновременном сохранении комфорта пассажиров посредством интеллектуальной системы помощи водителю.

Для достижения поставленной цели исследования определены и решены следующие задачи:

1. Разработка структуры ИСПВ.
2. Разработка правил принятия решений, направленных на обеспечение безопасности движения.
3. Разработка алгоритмов повышения точности датчиков на основе комплексирования сенсоров, фильтрации данных и анализа уровня загрязнения камер.
4. Разработка алгоритма управления скоростью, учитывающего изменения массы ТС.
5. Разработка алгоритма управления системой подвески для разных сценариев работы ТС.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. **Предложены требования к архитектуре ИСПВ**, которые учитывают специфику эксплуатации общественного транспорта и включают в себя интеграцию сенсоров, модулей обработки данных и алгоритмов

управления для работы в сложных дорожных условиях.

2. **Разработаны правила принятия решений**, основанные на данных радаров и камер для оценки вероятности столкновения с препятствиями на дороге.
3. **Разработаны алгоритмы повышения точности информации с датчиков**, которые основаны на комплексировании данных, фильтрации сигналов с радаров и определения загрязнений камеры для увеличения надёжности системы.
4. **Получено решение задачи управления скоростью ТС**, обеспечивающее стабильность работы, устойчивое к изменениям массы транспортного средства и свойств дорожного покрытия. Предложенный алгоритм построен на методах адаптивного управления и наблюдения.
5. **Разработан алгоритм управления системой подвески**, который учитывает комфорт пассажиров и обеспечивает плавность движения ТС при различных скоростях.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов обеспечения безопасности и эффективности управления общественным транспортом, основанных на обработке данных сенсоров, прогнозировании ситуаций и управлении движением, с учётом динамических условий эксплуатации и требований к комфорту пассажиров.

Практическая значимость.

1. Разработана методика управления динамическими характеристиками ТС с учётом изменения массы и дорожных условий, обеспечивающая стабильность и безопасность движения автобусов и электробусов.
2. Разработаны алгоритмы управления системой подвески, которые повышают комфорт пассажиров и управляемость транспортного средства, обеспечивая снижение вибраций и повышение плавности движения.
3. Разработана методика предотвращения аварийных ситуаций, включающая прогнозирование столкновений и обработку данных от радаров и камер.
4. Создан программный модуль ИСПВ, интегрируемый в системы управления общественным транспортом и подходящий для использования в автобусах и автомобилях.
5. Разработаны подходы для поддержки автономного управления транспортного средства, которые закладывают основу для перехода к полностью автономным транспортным средствам, что способствует улучшению точности расписания и снижению затрат на эксплуатацию.
6. Разработаны программы и методики испытания на трех уровнях верификации, которые включают: программное моделирование (Software-in-the-Loop(SIL)), полунатурное моделирование (Hardware-in-the-Loop(HIL)) и реальные испытания на полигоне на транспортном средстве (Vehicle-in-the-Loop (VIL)).

Методология и методы исследования. В диссертации использованы методы теории управления, комплексирования данных датчиков, машинного обучения и математического моделирования для разработки ИСПВ для автобусов и электробусов. Алгоритмы регулирования скорости и управления подвеской разрабатывались с учётом неопределённости, вызванной изменением массы транспортного средства и дорожных условий.

Методы машинного обучения использовались для анализа данных с камер и радаров, что обеспечивало высокую точность распознавания объектов. Комплексирование данных с этих сенсоров улучшило устойчивость и надёжность системы, снижая влияние шума и контролируя точность показаний сенсоров.

Математическое и имитационное моделирование проводилось в средах Matlab и Simulink, а программное обеспечение разрабатывалось на C++ с использованием Robot Operating System (ROS). Для проверки работоспособности разработанных решений проводились экспериментальные испытания на реальных транспортных средствах. Такой подход объединил теоретические разработки с практическим внедрением.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Методика учета динамических характеристик транспортного средства, основанная на анализе изменений массы и дорожных условий, позволяющая обеспечить стабильность и безопасность движения автобусов и электробусов в условиях неопределённости.

2. Метод обеспечения безопасности движения за счёт выбора регулирования скорости, позволяющий минимизировать риск столкновений и выполнить целевые задачи при соблюдении требований к качеству движения.

3. Модель сенсорного комплексирования данных от камер и радаров, направленная на устранение выбросов, контроль загрязнения сенсоров и повышение точности восприятия окружающей среды для улучшения устойчивости системы в реальных условиях.

4. Алгоритм управления подвеской транспортного средства, обеспечивающий повышение комфорта пассажиров и стабильность управления, с учётом различных скоростей движения и дорожных условий.

5. Имитационная модель интеллектуальной системы помощи водителю, позволяющая тестировать и оптимизировать разработанные алгоритмы в виртуальных условиях, что обеспечивает проверку их эффективности перед внедрением в реальные транспортные средства.

Достоверность результатов работы подтверждается корректностью поставленных задач исследования, адекватностью применяемых методов и подтверждается результатами компьютерного моделирования, результатами испытаний разработанного программного обеспечения и натурных испытаний.

Внедрение результатов. Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «ИЦ КАМАЗ» при разработке интеллектуальной системы помощи водителю (ИСПВ) для автобусов и электробусов. На основе материалов исследования реализованы алгоритмы управления скоростью, траекторией и

методы сенсорного комплексирования. Внедрение подтверждено актом внедрения ООО «ИЦ КАМАЗ».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались на международных конференциях, включая «Современные проблемы робототехники» (Москва, 2021–2022 гг.), «Моделирование в инженерном деле» (Москва, 2021, 2023 гг.), «Наука, технология и бизнес» (Москва, 2022 г.), «International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)» (Москва, 2023, 2024, 2025 гг.) и на 34-35 международных научно-практических конференциях «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2023, 2024 г.).

Публикации. Опубликовано 16 работ по теме диссертации, в том числе 6 в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, 3 в изданиях РИНЦ и 7 в изданиях, индексируемых международной базой научного цитирования (Web of Science, Scopus).

Личный вклад автора. Исследования, результаты которых представлены в диссертационной работе, выполнены соискателем лично в процессе научной деятельности. Соискателем лично проведён анализ современных направлений развития интеллектуальных систем помощи водителю, на основе которого определены ключевые научные и прикладные задачи исследования. Постановка цели и задач работы, а также определение основных направлений исследования выполнены совместно с научным руководителем. Для робототехнической платформы, предоставленной ООО «ИЦ КАМАЗ», автором лично разработан и реализован алгоритм локализации на основе данных радара и камеры. Испытательный стенд для проверки алгоритмов управления был спроектирован и собран автором совместно со специалистами ООО «ИЦ КАМАЗ». Кроме того, автором лично разработано программное обеспечение для моделирования работы системы помощи водителю, а также лично проведены экспериментальные исследования и демонстрация работоспособности предложенных методов и алгоритмов управления.

Работа выполнена в соответствии со следующими пунктами паспорта специальности 2.5.4 - Роботы, мехатроника и робототехнические системы:

П.4. Математическое и полунатурное моделирование мехатронных и робототехнических систем, включая взаимодействие со средой, анализ их характеристик, оптимизация и синтез по результатам моделирования.

П.5. Методы, алгоритмы, программные и аппаратные средства управления роботами, робототехническими и мехатронными системами, включая адаптивное, оптимальное, распределенное, интеллектуальное и супервизорное управление.

П.10. Интерфейсы и методы взаимодействия человека с роботами. Методы эффективной и безопасной совместной работы человека и роботов. Коллаборативные роботы.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, и списка литературы. Работа изложена на 133 машинописной странице, содержит 41 рисунок и 13 таблиц. Список литературы включает в себя 98 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава диссертации фокусируется на анализе существующих научных исследований и разработок в области ИСПВ, которые становятся все более важными в современном автомобилестроении. Данная глава предоставляет критический обзор ключевых научных трудов, затрагивающих различные аспекты разработки и внедрения ИСПВ, от структуры систем и алгоритмов распознавания до управления скоростью и оптимизации подвески на основе данных датчиков.

По результатам первой главы была предложена архитектура системы как показано на Рисунке 1. Данная архитектура системы должна стабильно функционировать в рабочем диапазоне скоростей транспортного средства от 10 до 90 км/ч. Её эксплуатация гарантируется в различных погодных условиях, включая солнечную погоду, дождь, снег, туман и обледенение, а также на разных типах дорог и дорожных покрытиях. Конструкция системы предусматривает возможность её использования на транспортном средстве, рассчитанном на перевозку до 85 пассажиров с максимальной полной массой до 18 тонн. Для обнаружения объектов система использует радар с дальностью действия до 250 м, углом обзора до 120° и скоростью передачи данных 500 Кбит/с, который дополняется камерой с частотой съёмки не менее 20 кадров в секунду. Производительность системы должна обеспечивать одновременное отслеживание и классификацию до 25 объектов, относящихся к следующим классам: пешеходы, легковые и крупногабаритные транспортные средства. При этом максимально допустимая задержка обработки данных и реакции системы не должна превышать 0,3 с.

Функциональная схема взаимодействия водителя с транспортным средством представлена на Рисунке 2, на котором: S1 - пороговое значение дистанции для частичного торможения, S2 - для полного торможения; S0 - расстояние между ТС и препятствием; *TTC* (Time to collision) - время до столкновения

$$TTC = \begin{cases} \frac{s}{v} & \text{для } v > 0 \text{ и } a = 0, \\ \frac{v - \sqrt{v^2 - 2as}}{a} & \text{для } v > 0 \text{ и } a \neq 0, \end{cases} \quad (1)$$

где *s*-расстояние до препятствия, *v*, *a*- скорость и ускорение транспортного средства.

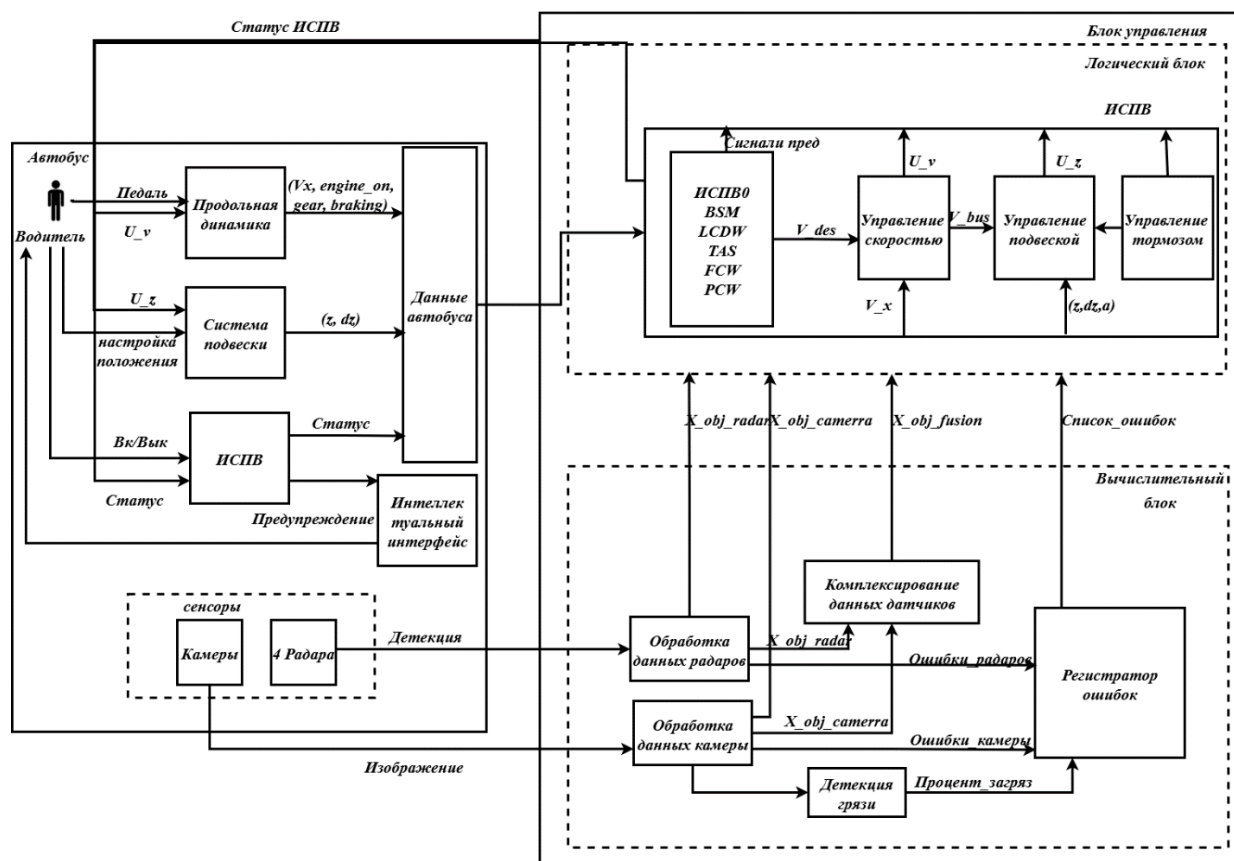


Рисунок 1. Структурная схема ИСПВ

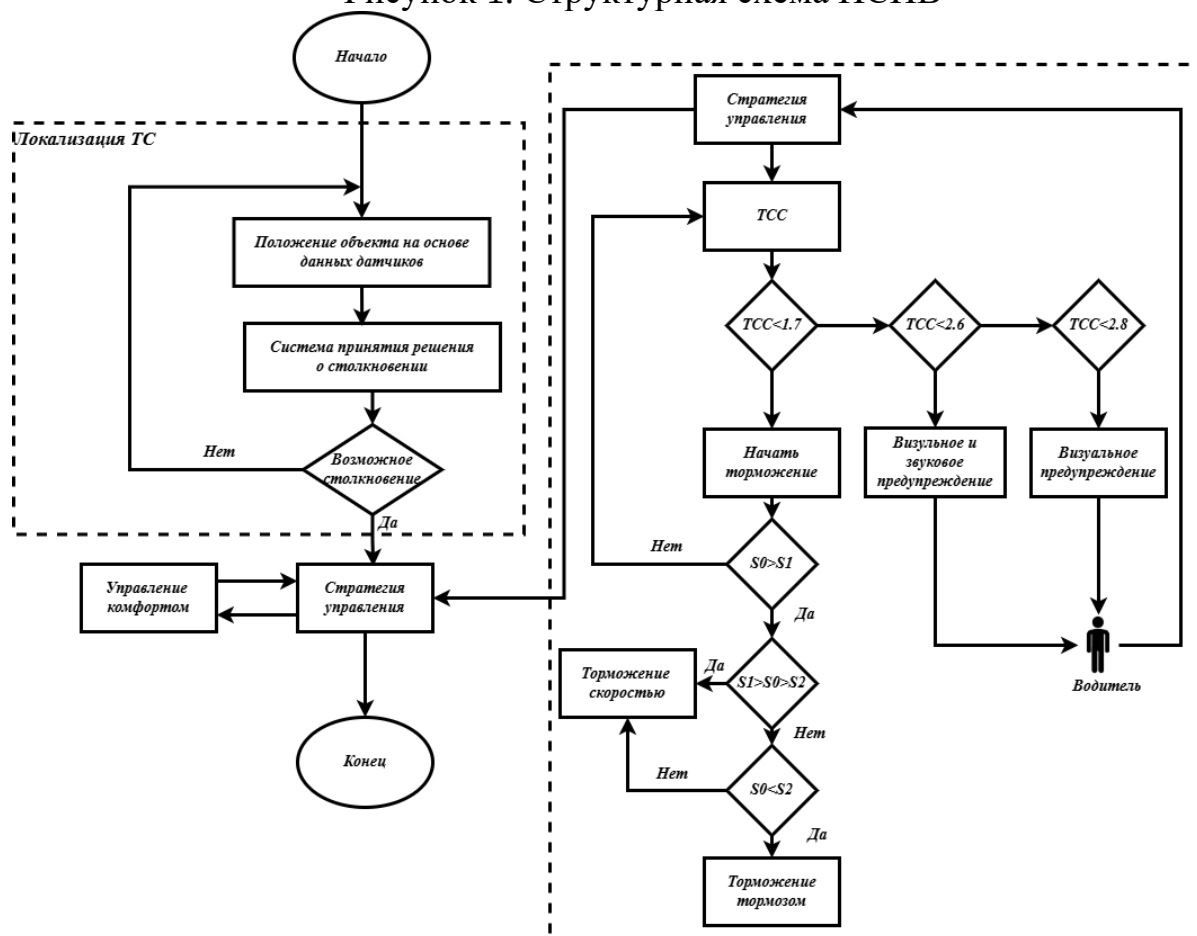


Рисунок 2. Схема взаимодействия водителя с транспортным средством

Ключевые задачи помощи водителю общественного транспорта, направленные на безопасность, эффективность и комфорт (Рисунок 2), решаются через три уровня. **Уровень 0 (Информирование системы)** включает алгоритмы анализа дорожной обстановки для распознавания критических ситуаций (сужение интервала, препятствия) и предупреждения водителя. **Уровень 1 (Управление скоростью)** обеспечивает стабильность движения за счёт алгоритмов, адаптирующихся к изменению массы ТС и дорожного покрытия, используя активное управление подавлением помех (АУПП). **Уровень 2 (Управление подвеской)** повышает комфорт пассажиров и устойчивость ТС за счёт адаптации подвески для снижения вибраций. Все задачи реализованы на основе комплексирования данных с датчиков, математического моделирования и экспериментальной проверки.

Управляющие сигналы на нулевом уровне представляют собой предупреждения для водителя, которые формируются на основе логических правил:

$$Warning = \begin{cases} 1, & (\text{Столкновение} = True) \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (2)$$

При возникновении риска столкновения, система на начальном уровне вмешательства формирует предупреждение для водителя. В случае отсутствия реакции со стороны водителя она должна самостоятельно осуществлять управление скоростью и тормозными воздействиями (уровни 1-2).

В рамках данного исследования требуется сформировать набор правил, позволяющих оценивать вероятность столкновения с участниками дорожного движения для каждой системы помощи водителю. Для реализации (2) нужно для всех систем определить вектор состояния участников дорожного движения $\mathbf{x}_{i,t} = [x_{i,t}, y_{i,t}, Vx_{i,t}, Vy_{i,t}]$.

Вектор состояния объектов определяется радаром (в системах мониторинга слепых зон, предупреждения о снижении бокового интервала и помощи при повороте), камерой (в системе предупреждения о столкновении с пешеходом) или их комплексированием (в системе предупреждения о лобовом столкновении).

Требуется разработка алгоритмов детекции и локализации объектов на основе радаров, камер или их комбинации с точностью выше 0,85 по F1. Необходимо решить проблемы загрязнения камер и обработки больших объемов данных радаров через алгоритмы реального времени. Далее необходимо разработать стратегию управления для поддержания требуемой скорости транспорта:

$$v = \frac{1}{mr} u - \frac{1}{m} (F_a + F_r + F_b) \quad (3)$$

где $u = T_d - T_b$ – сигнал управления, $T_d = i_g i_0 \eta T_t$ – крутящий момент движения, $T_b = K_b P_b \eta$ – тормозной момент, $F_a = 0,5 C_d A v^2$ – сопротивление воздуха, $F_r = f_r m g$ – сопротивление качению и внешним возмущениям.

При работе системы отслеживания скорости возникают проблемы с комфортом пассажиров и управляемостью ТС. Комфорт оценивается следующим показателем:

$$\sigma_1 = RMS(\ddot{z}), \quad (4)$$

где $\ddot{z}$ - вертикальное ускорение массы кузова транспортного средства.

Степень управляемости оценивается с использованием следующего предложенного критерия:

$$\sigma_2 = \sqrt{\int_{0Hz}^{20Hz} S_\varphi \times \frac{\sum_{i=1}^4 DLC_i}{4}}, \quad (5)$$

где S_φ - спектральная плотность мощности угла крена, DLC_i - коэффициент динамической нагрузки (Dynamic Load Coefficient, DLC) в i -м углу ТС и вычисляется следующим уравнением:

$$DLC_i = RMS\left(\frac{K_u(z_{ui} - z_{ri})}{(m_{si} + m_u)g}\right) = RMS\left(-\frac{(m_s/4)\ddot{z}_{si} + m_u\ddot{z}_{ui}}{((m_s/4) + m_u)g}\right), \quad (6)$$

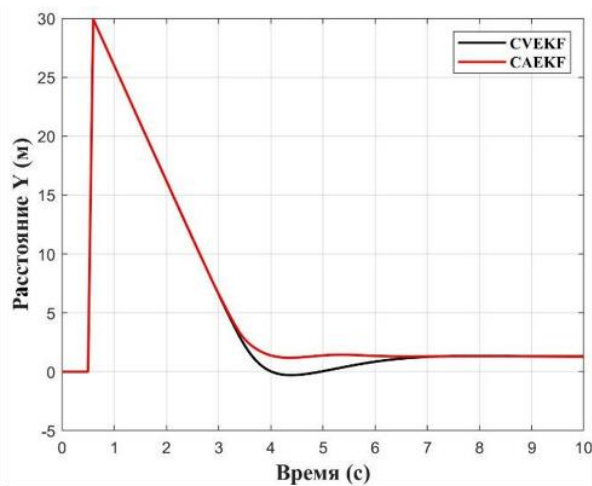
где m_s, m_u - подрессоренная и неподрессоренная массы, z_s, z_u - высоты подрессоренной и неподрессоренной массы колеса, K_u - жесткость пружины шины.

Согласно ISO 2631-1 (1997), при амплитуде дорожных возмущений до 7 см и скорости 20-90 км/ч среднеквадратичная ошибка вертикального ускорения должна удовлетворять условию $\sigma_1 \leq 0,31 \text{ м/с}^2$ - ограничение в вопросе комфорта; а степень управляемости должна удовлетворять условию $\sigma_2 \leq 3.00 \times 10^{-4}$.

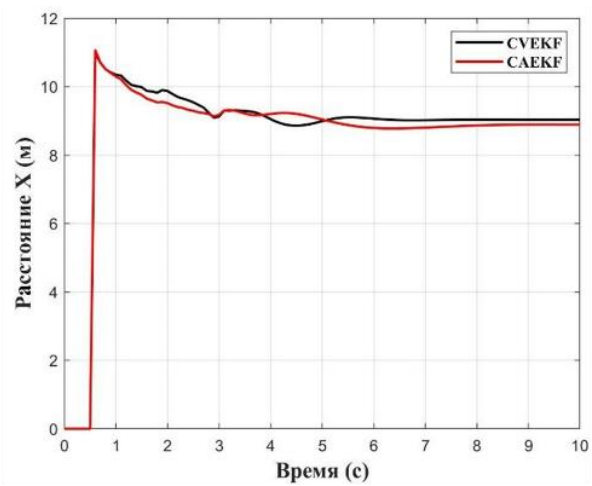
Таким образом, в работе были обоснованы требования для определения условий предупреждения в зависимости от локализации транспортного средства относительно объектов. Также подчеркнута необходимость разработки закона управления скоростью и подвеской для обеспечения безопасного и комфортного движения.

Вторая глава посвящена алгоритмам детекции и отслеживания объектов. Для обработки радарных данных используется кластеризация DBSCAN, позволяющая выделять значимые объекты из облака точек. Для распознавания объектов по видеоданным применяется алгоритм YOLO. После кластеризации расширенный ФК (РФК) уточняет траектории объектов, прогнозируя их положение, фильтруя шумы и обеспечивая комплексирование данных с различных сенсоров. Совместное использование DBSCAN и РФК обеспечивает точное и надежное отслеживание объектов в реальном времени для систем помощи водителю. РФК работает в режимах предсказания и коррекции.

На Рисунке 3 Представлены результаты моделирования РФК для слежения за постоянной скоростью и постоянным ускорением. Модель постоянного ускорения показывает лучшие результаты, чем модель постоянной скорости. Вероятность срабатывания системы повышается по мере приближения отслеживаемого объекта.



(a)



(б)

Рисунок 3. Сравнение между моделями постоянной скорости РФК (CVEKF- Constant Velocity Extended Kalman Filter) и постоянного ускорения РФК (CAEKF- Constant Acceleration Extended Kalman Filter): а) отслеживание положение по координате Y; б) отслеживание положения по координате X

Для отслеживания пешеходов используется комбинация детектора YOLO и центроидного трекера с присвоением уникальных идентификаторов. Позиция объектов прогнозируется ФК, а расстояние оценивается алгоритмом PnP (Perspective-n-Point) на основе ограничивающих рамок и калибровки камеры. Для достижения требуемой точности нейросеть обучалась на различных наборах данных с подбором оптимизатора. Наилучший результат по метрике **F1-score = 0,871**, соответствующий предъявляемым требованиям, был показан при обучении на комбинированном наборе данных, включающем датасет KITTI и собственный датасет, с использованием оптимизатора стохастического градиентного спуска SGD (Stochastic Gradient Descent).

Результаты оценки положения объектов в пространстве на основе радаров представлены на Рисунке 4 и на основе камеры представлены на Рисунке 5.

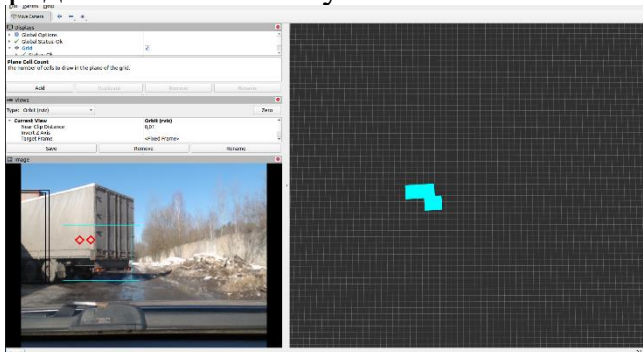


Рисунок 4. Оценка положение объектов в пространстве с помощью DBSCAN и расширенного фильтра Калмана в режиме реального времени



Рисунок 5. Оценка положение объектов в пространстве на основе камеры в режиме реального времени

Таким образом, разработаны методы оценки состояния объектов по данным радара и камеры для определения пространственного положения с высокой точностью. Обработка радарных данных использует алгоритм DBSCAN и РФК, видеоанализ осуществляется нейросетью YOLO с применением ФК.

В третьей главе рассмотрены базовые ИСПВ нулевого уровня и представлены две новые системы: помощи при повороте и предупреждения об уменьшении бокового интервала. Также представлена модель для расчёта вероятности столкновения с дорожными объектами на основе заданных параметров и правил в Таблице 1.

Таблица 1.

Правила принятия решения для ИСПВ 0

Система	Правило принятия решения
Система мониторинга слепых зон (BSM)	$BSM_{warning} = \begin{cases} 1, & ((Speed_Bus \& Gear \& X_position \& Y_position \& Obj_velocity) = True) \\ 0, & else \end{cases}$
Предупреждения об уменьшении бокового интервала (LCW)	$LCW_{warning} = \begin{cases} 1, & ((Speed_Bus \& Gear \& X_position \& Y_position) = True) \\ 0, & else \end{cases}$
Система помощи при повороте (TAS)	$TAS_{warning} = \begin{cases} 1, & ((Speed_Bus \& Gear \& X_position \& Y_position \& Theta_turning) = True) \\ 0, & else \end{cases}$
Система предупреждения фронтального столкновения (FCW)	$FCW_{warning} = \begin{cases} 1, & ((In_zone \& required_acceleration \& V_x) = True) \\ 0, & else \end{cases}$

Для повышения точности и надёжности работы системы применяется метод объединения данных радаров и камер на основе РФК. Первичная оценка состояния объектов осуществляется по данным радаров, а последующая коррекция – по данным камеры. Ключевой задачей является установление соответствия между объектами, обнаруженными радаром и камерой. Данная задача решается путём оценки расстояния между парой объектов: если расстояние между ними составляет **менее 0,2 м**, они считаются одним и тем же объектом.

Также, предложен новый алгоритм фильтрации данных радаров на основе анализа координат:

$$\begin{aligned}
 x_{mean} &= \sum \frac{x_i}{N}; \\
 y_{mean} &= \sum \frac{y_i}{N}; \\
 T_x &= x_{mean} + \left(\frac{\max(x_i) - \min(x_i)}{2} \right); \\
 T_y &= y_{mean} + \left(\frac{\max(y_i) - \min(y_i)}{2} \right); \\
 P(x, y) &< (T_x, T_y).
 \end{aligned} \tag{7}$$

Результат работы алгоритма представлен на Рисунке 6 где показан объём данных до фильтрации и объём данных после фильтрации, что влияет на увеличение скорости работы и точности данных радара.

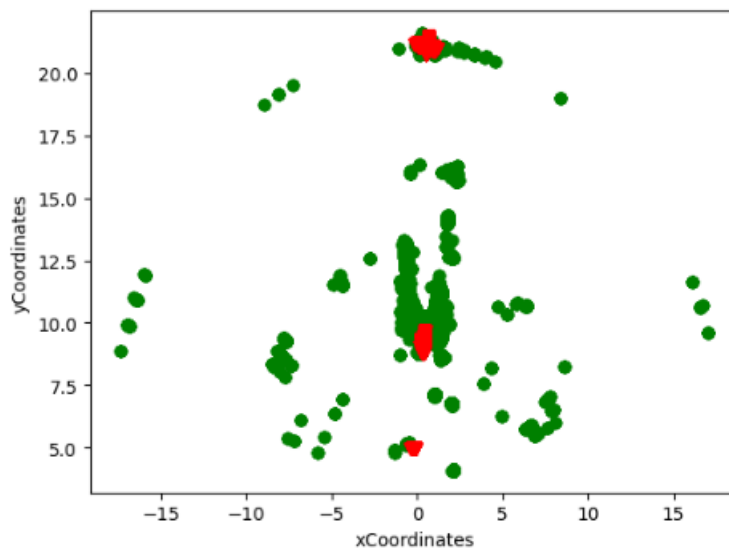


Рисунок 6. Результат работы алгоритма: зеленые точки – все данные радара; красные точки – данные радара после фильтрации

В качестве алгоритма поддержки точности датчиков разработан метод оценки загрязнения камеры, включающий последовательное объединение серии изображений, выделение контуров и расчет степени загрязнения. Обработка основана на преобразовании изображений в градации серого, пороговой фильтрации и морфологической обработке для выделения областей загрязнения. Камера признается загрязненной при превышении доли загрязненных пикселей **порога в 20%**, что сопровождается соответствующим предупреждением.

Далее алгоритмы повышения точности датчиков были протестированы на полигоне в режиме реального времени, чтобы определить работоспособность ИСПВ в целом. Результаты тестирования представлены на Рисунке 7.



Рисунок 7. Испытания на полигоне для разных систем помощи водителю и различных сценариев. Где: 1 — ТС с ИСПВ, 2 — участник дорожного движения, 3 — предупреждения в соответствии с текущей ситуацией

Оценка эффективности и точности разных систем была проведена при помощи испытаний в разных условиях. Результаты представлены в Таблице 2.

Таблица 2.

Результаты испытания на полигон в режиме реального времени для ИСПВ 0

Система	Испытания	Истинно позитивно (ИП)	Ложноположительное (ЛП)	Ложноотрицательное (ЛО)	F1
BSM	50	40	8	2	0.888
LCDW	50	42	5	3	0.913
TAS	50	41	6	3	0.901
FCW	50	43	6	1	0.924
PCW	50	39	9	2	0.876

Таблица 2 показывает, что использование комплексирования данных с датчиков в системе (FCW) показывает на 7 % большую точность работы чем радарная система BSM и на 8% чем система камеры PCW.

Таким образом, в данной главе были разработаны методы принятия решений для Уровня 0 (Информирование водителя), а также алгоритмы повышения точности данных датчиков, реализованные с помощью трёх различных методов. Проведено тестирование информационных систем в режиме реального времени на полигоне. Результаты испытаний демонстрируют более высокую точность системы предупреждения о фронтальном столкновении (FCW), созданной на основе комплексирования данных от радара и камеры, по сравнению с радарными системами (BSM, LCDW, TAS) и системой, использующей только камеру (PCW).

В главе 4 рассматривается управление скоростью при изменении массы транспортного средства. Для общественного транспорта колебания загрузки (от пустого до перегруженного) создают критические условия работы системы. Силы, действующие на транспортное средство, описываются вторым законом Ньютона:

$$m \frac{dv}{dt} = \sum F = F_d - F_b, \quad (8)$$

$$m \dot{v} = \frac{1}{r} (T_d - T_b) - F_a - F_r - F_b,$$

где F_b – внешнее возмущение. Учитывая (3) и $x_1 = v$, можно переписать уравнение (8):

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{mr} u - \frac{1}{m} (F_a + F_r + F_b). \quad (9)$$

Механизм распределения крутящего момента продольного управления двигателем определяется следующим образом:

$$u = \begin{cases} T_d, & \text{if } (a > 0) \\ T_d, & \text{if } (a = 0 \ \& \ v \neq 0) \\ T_b, & \text{if } (a < 0) \\ T_b, & \text{if } (a = 0 \ \& \ v = 0). \end{cases} \quad (10)$$

Общий алгоритм управления в таких условиях и также структура АУПП представлены на Рисунке 8.

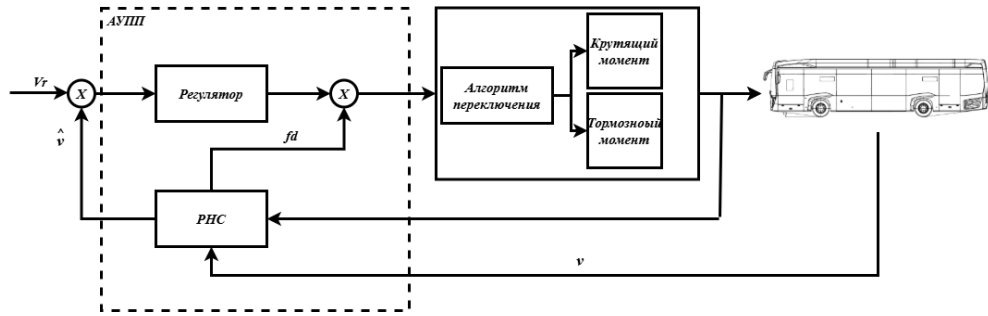


Рисунок 8. Схема управления скоростью транспортного средства

Модель наблюдателя:

$$\begin{aligned}
 \hat{x}(k) &= A_d \hat{x}(k-1) + B_d u(k-1) + L \hat{y}(k-1), \\
 \hat{y}(k-1) &= C_d \hat{x}(k-1), C_d = (1 \ 0), \\
 \Rightarrow \hat{x}(k) &= [A_d + B_d K + L C_d] \hat{x}(k-1), \\
 L &= \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix}, A_d = \begin{pmatrix} 1 & T_d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, B_d = \begin{pmatrix} T_d b_0 \\ 0 \end{pmatrix},
 \end{aligned} \tag{11}$$

где $\hat{y}(k-1)$ - реальный результат. Чтобы эта система была устойчивой, общая матрица состояния должна иметь корни в единичном круге:

$$\begin{aligned}
 &eign[zI_2 - A_d - B_d K - L C_d] \text{ inside the unit circle:} \\
 \det \begin{bmatrix} z - 1 - \alpha_1 - T_d b_0 K_1 & T_d \\ -\alpha_2 & z - 1 \end{bmatrix} &= (z-1)(z-1-\alpha_1-T_d b_0 K_1) - \alpha_2 T_d,
 \end{aligned}$$

и, таким образом, после серии математических преобразований получаем характеристическое уравнение замкнутой системы

$$q(z) = z^1 - (\alpha_1 + 2 + T_d b_0 K_1) + \alpha_2 T_d + 1 + \alpha_1 + T_d b_0 K_1. \tag{12}$$

Согласно критериям устойчивости и применяя теорему Котельникова, пропускная способность наблюдателя может быть найдена из условия $K T_d w_d < 1$. Таким образом были выбраны следующие коэффициенты в уравнении наблюдателя:

$$z_{ESO} = e^{(K_{ESO} w_d)}; \alpha_1 = z_{ESO}^2; \alpha_2 = \frac{1 - z_{ESO}}{T_d} \tag{13}$$

Для проверки работоспособности алгоритм (11) был испытан на стенде (Рисунок 9), с тремя значениями скоростей (60, 90, 20) км/час, при изменении массы ТС и покрытия дороги.

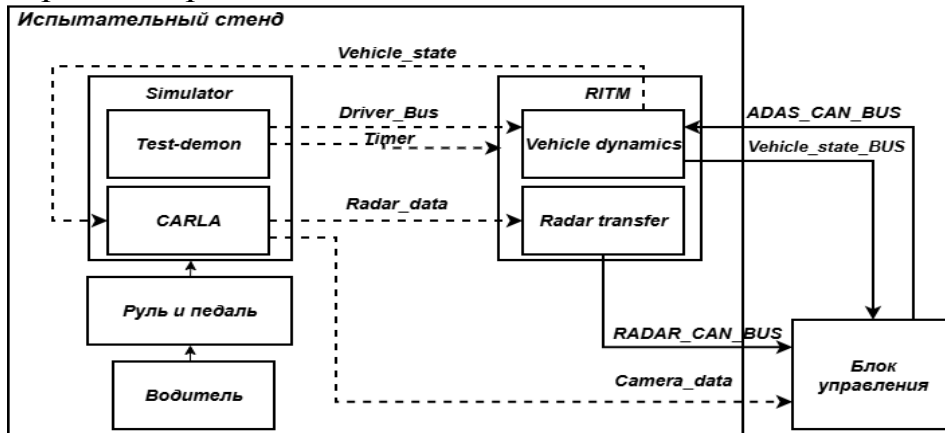


Рисунок 9. Испытательный стенд для тестирования алгоритмов управления в режиме реального времени

Результаты работы алгоритма АУПП по сравнению с алгоритмом управления на основе ПИД-регулятора представлены на Рисунке 10. Также результаты тестирования работы алгоритма на разных дорожных покрытиях представлены на Рисунке 11.

Алгоритм АУПП сохраняет стабильность без перенастройки при изменении массы ТС и демонстрирует плавные переходные процессы без перерегулирования. В отличие от ПИД-регулятора, требующего перенастройки параметров и склонного к значительному перерегулированию, АУПП обеспечивает безопасное управление. Результаты тестирования алгоритма при изменении массы и дорожных условий подтверждают его эффективность.

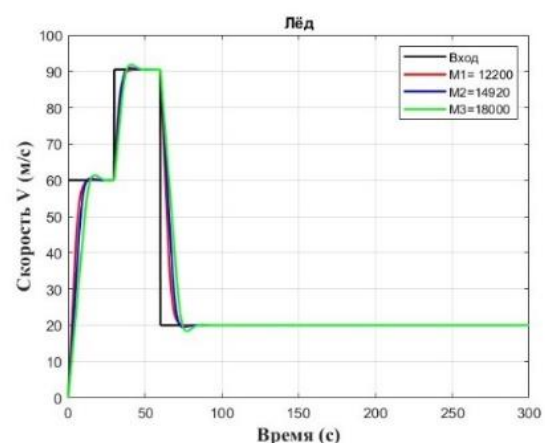
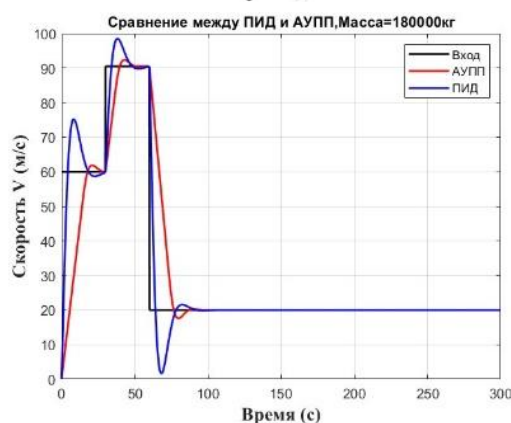
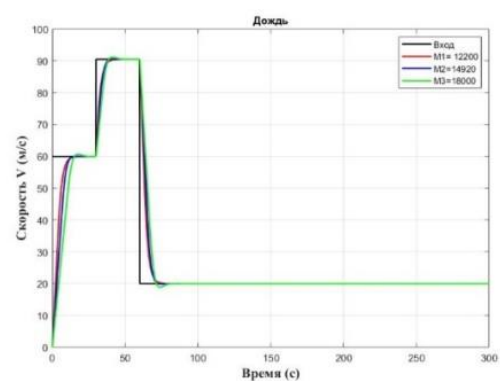
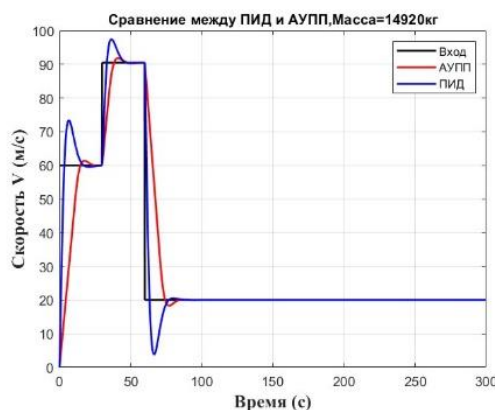
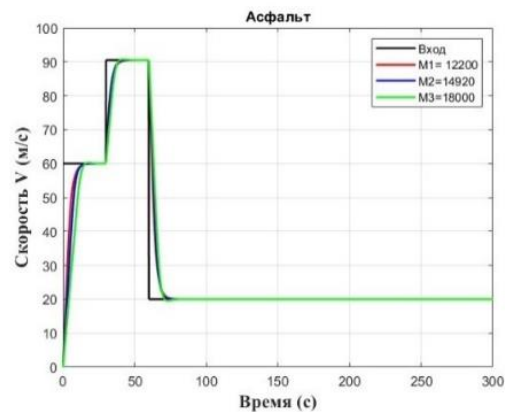
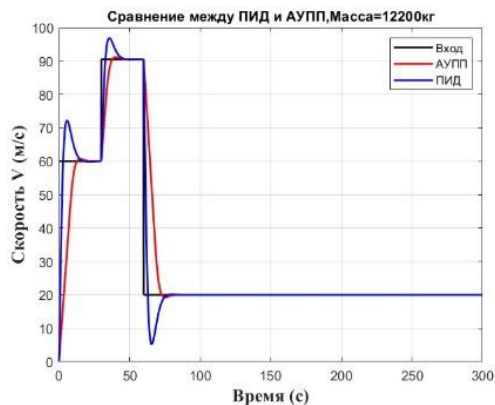


Рисунок 10. Сравнение между алгоритмами управления АУПП и ПИД для разных масс ТС

Рисунок 11. Управление скоростью с разными массами на разных дорожных покрытиях

Таким образом, в этой главе автором был разработан алгоритм управления на основе данных, который способен управлять транспортным средством независимо от изменения его массы или дорожного покрытия.

В главе 5 разработан алгоритм управления подвеской для обеспечения комфорта пассажиров. На основе требуемой скорости, определяемой данными радаров и камер (главы 2-3) и адаптивного управления скоростью (глава 4), алгоритм позволяет одним параметром регулировать баланс между устойчивостью и комфортом в различных дорожных условиях.

Функция качества, которая должна быть оптимизирована для системы подвески, определяется следующим образом:

$$J = \int_0^{T_p} [(1 - \rho)(\varphi(t + \tau))^2 + \rho(z_s(t + \tau))^2] d\tau, \quad (14)$$

где: T_p - период, в течение которого продолжается оптимизация; $z_s(t + \tau)$ - будущий момент времени τ ; $\varphi(t + \tau)$ - будущий бросок; ρ - параметр регулирования. После преобразований получаем закон управления, применяемый к вертикальному перемещению и крену, который определяется следующим уравнением:

$$u_i = -\frac{1}{\hat{b}_{0i}} (K_{pi}(y_i - y_{ri}) + K_{di}\hat{y}_i + \hat{f}_i), i = \{z, \varphi\}, \quad (15)$$

где:

$$K_{pz} = K_{p\varphi} = \frac{10}{3T_p^2}; K_{dz} = K_{d\varphi} = \frac{5}{2T_p}. \quad (16)$$

Характеристическое уравнение всей системы будет $\Delta(s) = s^2 + K_d s + K_p$ и система всегда будет устойчива по Гурвицу, если $K_p, K_d > 0$. Это всегда верно, если $T_p > 0$. Отсюда полюс замкнутого контура и коэффициент демпфирования системы, управляемой АУПП, могут быть рассчитаны.

$$\begin{aligned} K_p &= w_{CL}^2, \quad K_d = 2\xi w_{CL} \Rightarrow \\ -w_{CL} &= -\sqrt{K_p}, \quad \xi = 0.5 \frac{K_d}{\sqrt{K_p}} \end{aligned} \quad (17)$$

Система управления испытана по стандарту ISO 8608 в диапазоне скоростей 20-70 км/ч. При моделировании длительностью 1000 с оценивались спектральная плотность мощности вертикального ускорения (комфорт) и угла крена (управляемость). Результаты подтвердили соответствие критериям: уровень комфорта по ISO 2631-1 (RMS ускорения $< 0,31 \text{ м/с}^2$) и порог управляемости ($< 3.16 \times 10^{-4}$). Результаты испытаний алгоритма представлены на Рисунке 12.

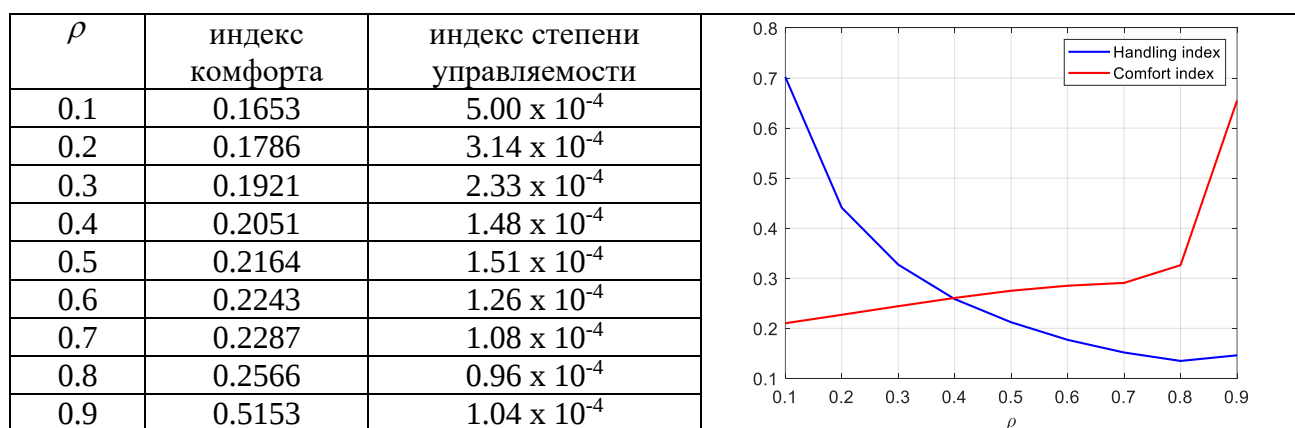


Рисунок 12. Нормализованные значения степени комфорта и степени управляемости в диапазоне $[0,1]$

Исходя из этого можно сделать вывод, что алгоритм обеспечивает баланс комфорта и управляемости (значения 0,2-0,8) за счет регулирования одного коэффициента, позволяя переключать режимы работы системы. Результаты для различных условий представлены в Таблице 3.

Таблица 3.

Значения параметра регулирования для обеспечения разных сценариев работы общественного транспорта

Условие движения	Описание системы	Рекомендуемое значение ρ	Приоритет
Гладкая дорога	Минимальная жёсткость, максимум комфорта	$\rho = 0.2$	Комфорт
Плохая дорога / Ухабы	Смягчение резких вертикальных ударов	$\rho = 0.25$	Комфорт
Переполненность салона	Фильтрация вибраций и вертикальных колебаний	$\rho = 0.3$	Повышенный комфорт
Городской трафик / частые остановки	Частые ускорения/торможения	$\rho = 0.35$	Комфорт
Высокая скорость (>70 км/ч)	Баланс между безопасностью и мягкостью хода	$\rho = 0.4$	Компромисс
Поворот или уклон	Увеличение жёсткости, стабилизация крена	$\rho = 0.6$	Управляемость
Экстренное торможение	Жесткая стабилизация кузова	$\rho = 0.7$	Управляемость

В Заключение подводятся итоги диссертационного исследования, излагаются его основные выводы и обобщающие результаты по вопросам, составляющим предмет исследования и имеющим как теоретическое, так и практическое значение.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена новая архитектура системы помощи водителю, основанная на данных с радаров и камеры, в которой комфорт пассажиров рассматривается как часть логики ИСПВ. Архитектура формирует целостную модель дорожной обстановки и, в отличие от традиционных

- решений, включает в себя модуль управления подвеской. В системе впервые реализованы две дополнительные подсистемы нулевого уровня: система предупреждения об уменьшении бокового интервала и система помощи при повороте.
2. Разработаны правила принятия решений для обеспечения безопасного движения транспортного средства. Правила основаны на данных радаров и камеры и учитывают скорость, положение объекта и расстояние до него. В зависимости от уровня опасности система сначала формирует предупреждение, а при необходимости инициирует торможение, что обеспечивает предсказуемое и устойчивое поведение.
 3. Разработан комплекс алгоритмов повышения точности сенсорных данных, включающий комплексирование данных радара и камеры с проверкой соответствия объектов с приоритетом радара, фильтрацию радарных измерений в зависимости от положения ТС и определение уровня загрязнения камеры на основе морфологических операций, что в совокупности повышает надёжность и точность восприятия окружающей среды.
 4. Разработан и реализован алгоритм управления скоростью, устойчивый к неопределённостям параметров транспортного средства и дорожных условий. Алгоритм построен на методах управления по наблюдению и способен автоматически компенсировать внешние возмущения, обеспечивая стабильное поддержание заданной скорости без перенастройки параметров.
 5. Разработан оптимизированный алгоритм управления подвеской для повышения комфорта пассажиров. Алгоритм использует один настраиваемый параметр, который позволяет изменять приоритет между комфортом и управляемостью. При промежуточном значении параметра (0.4) обеспечивается их одновременное поддержание. Алгоритм интегрирован в ИСПВ и адаптируется к различным дорожным сценариям: экстренное торможение, повороты и движение по скользкой дороге.
 6. Проведены многоуровневые испытания системы: программное моделирование (Software-in-the-Loop(SIL)), полунатурное моделирование (Hardware-in-the-Loop(HIL)) и реальные испытания на полигоне на транспортном средстве (Vehicle-in-the-Loop (VIL)). Эксперименты подтвердили эффективность предложенных решений: точность работы системы при комплексировании радара и камеры повысилась до 7%, алгоритм управления скоростью показал лучшие результаты по сравнению с ПИД-регулятором при изменении массы и сцепления, а управление подвеской обеспечило сохранение комфорта и устойчивости при различных сценариях движения.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТ

1. Адаптивное управление компромиссом между управляемостью и комфортом в модели типа «четверть автомобиля» / Я. Вассуф [и др.] // Проблемы управления. 2022. № 2. С. 36–48. (1 п.л./0,5 п.л.).
2. Управление активной подвеской автомобиля для обеспечения компромисса между степенью демпфирования и управляемости / Я. Вассуф [и др.] // Проблемы управления. 2023. № 1. С. 45–58. (1,25 п.л./0,45 п.л.).
3. Управление компромиссом между управляемостью и комфортом системы подвески типа «четверть автомобиля» с использованием активного управления подавлением помех и уравнивания Вышнеградского / Я. Вассуф [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23. № 7. С. 367–375. (1,2 п.л./0,45 п.л.).
4. Muhammed A., Yazan W., Alexander I. G. Linear-control vs. ADRC for automatic management of the handling-comfort contradiction of a quarter-car system // International Journal of Heavy Vehicle Systems. 2022. Vol. 29. No. 2. P. 145–162. (1,27 п.л./0,45 п.л.).
5. Вассуф Я., Серебрянный В.В., Яковлева Е.А. Усовершенствованные системы помощи водителю для общественного транспорта // Наука, технологии и бизнес. 2022. С. 333–346. (0,9 п.л./0,5 п.л.).
6. Вассуф Я., Тарасенко А.В., Осин Д.Ю. Разработка системы круиз-контроля для общественного транспорта // Наука и бизнес: пути развития. 2023. № 12(150). С. 77–80. (0,8 п.л./0,4 п.л.).
7. Метод управления скоростью в системах помощи водителю с использованием активного управления подавлением помех / Я. Вассуф [и др.] // Вестник МГТУ «Станкин». 2024. № 1(68). С. 8–16. (1,0 п.л./0,5 п.л.).
8. Image-based trajectory tracking and distance estimation of a follower robot from a leader one / Y. Wassouf [et al.] // AIP Conference Proceedings. AIP Publishing. 2023. Vol. 2833. No. 1. (0,9 п.л./0,4 п.л.).
9. Wassouf Y., Korekov E. M., Serebrenny V. V. Decision Making for Advanced Driver Assistance Systems for Public Transport // 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). IEEE. 2023. Vol. 5. P. 1–6. (0,68 п.л./0,3 п.л.).
10. Wassouf Y., Tarasenko A. V., Serebrenny V. V. Modelling Approaches and Control in Autonomous Driving and Advanced Driver Assistance Systems // 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, Russian Federation. 2024. P. 7–12. (0,7 п.л./0,3 п.л.).
11. Radar Based Lateral Clearance Decreasing Warning System / Y. Wassouf [et al.] // 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, Russian Federation. 2024. P. 12–18. (0,7 п.л./0,3 п.л.).

12. Wassouf Y., Tsokurenko G. V., Serebrenny V. V. Modern Approaches for Improving the Accuracy of Radar-Camera Sensors in Advanced Driver Assistance Systems // 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, Russian Federation. 2025. P. 152–158. (0,7 п.л./0,5 п.л.).
13. Разработка интеллектуальной системы помощи водителю для общественного транспорта / Я. Вассуф [и др.] // Экстремальная робототехника. 2024. № 1(34). С. 223–234. (0,9 п.л./0,4 п.л.).
14. Разработка системы управления комфортом пассажиров с учетом скорости на основе данных наблюдений для общественного транспорта / Я. Вассуф [и др.] // Экстремальная робототехника. 2024. № 1(35). С. 86–98. (1,27 п.л./0,4 п.л.).
15. Toward More Safety on the Roads: Development of a Lane Keep Assistance System for Public Transport / Y. Wassouf [et al.] // 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, Russian Federation. 2024. P. 1–6. (0,7 п.л./0,4 п.л.).
16. Разработка системы помощи водителю при повороте для общественного транспорта / Я. Вассуф [и др.] // Вестник МГТУ СТАНКИН. 2023. № 1(64). С. 67–79. (1 п.л./0,4 п.л.).