

На правах рукописи



ЗАВАТСКИЙ Александр Михайлович

**МЕТОДЫ АКТИВНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА МЕЖДУ
ОСЯМИ ПОЛНОПРИВОДНОГО ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ**

Специальность 2.5.11. Наземные транспортно-технологические
средства и комплексы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Келлер Андрей Владимирович
 (ФГАНУ «Социоцентр»)

Официальные оппоненты:

Филькин Николай Михайлович
 доктор технических наук, профессор,
 заведующий кафедрой «Автомобили и
 металлообрабатывающее оборудование»
 ФГБОУ ВО «Ижевский государственный
 технический университет
 им. М.Т. Калашникова»

Антонян Акоп Ваганович
 кандидат технических наук,
 ведущий инженер-программист
 ООО Инновационный центр «КАМАЗ»

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО «Нижегородский
 государственный технический
 университет им. Р.Е. Алексеева»**

Защита состоится «29» ноября 2023 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 31.1.008.01 при ФГУП «НАМИ», по адресу: 125438 г. Москва, Автомоторная ул., д.2.

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

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

Автореферат разослан «27» сентября 2023 года

Ученый секретарь
 диссертационного совета
 к.т.н., доцент

Курмаев Ринат Ханяфиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы.

В связи с ухудшением экологической обстановки в настоящий момент происходит активное развитие автомобилей с электрическими и комбинированными энергоустановками (КЭУ) по всему миру. Параллельно с этим сохраняется рост рынка полноприводных легковых автомобилей, как с ДВС в качестве силовой установки, так и с электрическими и комбинированными энергоустановками. Для автомобилей с ДВС и с некоторыми схемами КЭУ распределение момента по колёсам выполняется механически при помощи агрегатов систем полного привода, как пассивных, с жестким включением и дифференциалами, так и активных, как правило с применением фрикционных муфт. Активные системы полного привода, которые состоят из механической части и электронного блока управления распределением момента, применяются для повышения уровня проходимости, безопасности и других потребительских свойств автомобиля. Однако, большая доля полноприводных электромобилей и автомобилей с КЭУ имеет схемы, при которых крутящий момент генерируется электромоторами независимо на передней и задней оси или на каждом колесе. Т.к. в этом случае передняя и задняя ось электромобиля не связаны друг с другом механически, если не считать связь через опорную поверхность, наличие автоматического распределения момента по осям или колёсам становится не только дополнением для повышения уровня потребительских свойств, но и базовой необходимостью.

Таким образом, **актуальность** избранной темы определяется ростом рынка автомобилей с электрическими силовыми установками, ростом рынка полноприводных автомобилей, и необходимостью в связи с этим разработки методов распределения запрашиваемого момента между электромоторами, обеспечивающих конкурентоспособный уровень потребительских свойств.

Степень разработанности темы исследования.

Активное распределения момента играет важную роль в достижении максимальных динамических качеств, особенно в сложных дорожных ситуациях, таких как движение в повороте на грани сноса/заноса или движение по поверхностям с низким или переменным коэффициентом сцепления. Поэтому вопросы влияния активного распределения на устойчивость и управляемость активно исследуются как в России, так и за рубежом.

Теоретические основы управляемости и устойчивости колёсных машин были заложены еще в 70х годах прошлого века советскими и зарубежными учеными, в частности Д.А. Антоновым, Я.С. Агейкиным, А.С. Литвиновым, Я.Е. Фаробиным, Д.Р. Эллисом.

По мере совершенствования конструкций автомобилей последовательно возрастала необходимость обоснования рационального распределения мощности силовой установки между отдельными колесными двигателями с целью повышения проходимости, управляемости, и устойчивости. Наиболее известными в этой области являются работы Бахмутова С.В., Круташова А.В, Келлера А.В. Жилейкина М.М., Маттиса Кломпа.

Переход от распределения момента единой силовой установки двухосных легковых автомобилей к индивидуальным электромоторам на каждую ось или каждое колесо расширил возможности и область исследования влияния активного распределения момента между ведущими колёсами. Легковые автомобили с электрическими силовыми установками с каждым годом занимают всё более значительную долю рынка автомобилей, поэтому этим исследованиям уделяют большое внимание большинство мировых автопроизводителей и исследовательских центров. Исследованию влияния смены привода автомобилей с КЭУ на управляемость и курсовую устойчивость посвящены работы Баулиной Е.Е. Исследованиям распределения запрашиваемого момента по электромоторам автомобиля посвящены работы Т. Аглиуллина, В. Иванова, Леонардо Де Новеллиса, Пердо Антунеза и др.

Несмотря на большой объем выполненных исследований, большинство из них посвящены управлению распределением мощности с использованием механизмов механической трансмиссии, поэтому в настоящее время недостаточно исследованы методы управления распределением мощности между ведущими осями автомобилей с электрической трансмиссией.

Цель работы - разработка методов активного распределения момента по осям электромобиля, обеспечивающих повышение курсовой устойчивости и управляемости двухосного автомобиля и противодействие буксованию ведущих колёс.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. разработать имитационную модель движения автомобиля для исследований, тестирования и отладки алгоритмов распределения момента по осям двухмоторного электромобиля и выполнить оценку её адекватности;
2. разработать метод повышения курсовой устойчивости путём активного распределения момента по осям электромобиля;
3. разработать метод противодействия буксованию путём активного распределения момента по осям электромобиля;
4. исследовать работоспособность и эффективность предложенных методов.

Объект исследования: Система полного привода двухосного электромобиля.

Предмет исследования: процессы управления распределением запрашиваемого момента между передней и задней осью автомобиля.

Методология и методы диссертационного исследования.

При разработке методов активного распределения момента применялись методы имитационного моделирования, методы суррогатного моделирования и методы оптимизации. Для исследования эффективности предложенных методов использовались методы имитационного моделирования и экспериментальных исследований при подготовке и проведении испытаний, а также методы математической статистики при обработке полученных экспериментальных данных.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Разработанные методы позволяют повысить уровень конкурентоспособности автомобиля за счет улучшения его эксплуатационных свойств, в частности повышения курсовой устойчивости.

Разработанные методы реализованы и внедрены в структуру программного обеспечения транспортного средства с КЭУ разрабатываемого во ФГУП «НАМИ». Представленный в диссертации комплекс методов разработан для электромобилей с индивидуальным приводом на каждую ось, однако с некоторыми изменениями может быть использован и в составе других типов двухосных транспортных средств, как с электроприводами, так и с ДВС с управляемыми системами распределения момента.

Научная новизна результатов исследования заключается:

1. в новом комплексном методе повышения курсовой устойчивости, отличающимся применением комбинированного регулятора, обеспечивающего целевую поворачиваемость автомобиля, и способствующего возвращению курсовой устойчивости в случаях сноса, заноса и контрповорота путём перераспределения запроса момента между осями автомобиля.
2. в новом комплексном методе противодействия буксованию колёс, отличающимся применением функции подавления автоколебаний крутящего момента.

Положения, выносимые на защиту.

1. Комплексный метод повышения курсовой устойчивости, на основе комбинированного регулятора обеспечивающего целевую поворачиваемость автомобиля, и способствующего возвращению курсовой устойчивости в случаях сноса, заноса и контрповорота путём перераспределения запроса момента между осями автомобиля.
2. Комплексный метод противодействия буксованию колёс, на основе комбинированного регулятора, включающий функцию подавления автоколебаний крутящего момента.

Реализация работы.

Предложенные в диссертационной работе методы реализованы в среде графического программирования MatLab Simulink. Полученная модель управления испытана в режиме ко-симуляции на имитационной модели, разработанной в Siemens Amesim.

На основе модели управления сгенерировано программное обеспечение для целевого электронного блока управления, которая была испытана на стенде реального времени LabCar.

После стендового тестирования проведены испытания в составе автомобиля на полигоне НИЦИАМТ, автодроме автомобильно-мотоциклетного клуба федеральной службы охраны Российской Федерации (АМК ФСО РФ), гоночном треке «ADM Raceway» и на ледяной поверхности озера, подготовленной джип-клубом «Лебедушка».

Результаты работы внедрены во ФГУП «НАМИ», при разработке прототипов автомобилей на электротяге проекта ЕМП, и в учебный процесс ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет».

Обоснованность и достоверность результатов.

Достоверность результатов имитационного моделирования движения автомобиля подтверждается валидационными испытаниями, в ходе которых установлена сходимость результатов имитационного моделирования и результатов заездов на целевом прототипе с комбинированной энергоустановкой, разрабатываемого во ФГУП «НАМИ» в рамках проекта «Единая модульная платформа».

Обоснованность предложенных методов распределения момента определяется общепризнанными теоретическими положениями, на которых они основаны и аргументированным обоснованием применения этих теоретических положений.

Достоверность и обоснованность результатов исследования работоспособности и эффективности предложенных методов, подтверждается

применением общепризнанных методов дорожных испытаний автотранспортных средств на курсовую устойчивость в разных дорожных условиях. Численное сопоставление расчетных данных с результатами эталонных измерений выполнено посредством общепринятых методов расчета погрешностей и статистических оценок достоверности.

Апробация работы.

Результаты, полученные в рамках диссертационного исследования, обсуждались и докладывались на:

- VII Международной конференции «Проблемы механики современных машин» в ВСГУТУ, 2018 г, г. Улан-Удэ;
- Международном автомобильном научном форуме «МАНФ-2022» в ФГУП «НАМИ», 2022г, г. Москва;
- Международной конференции «Моделирование в инженерном деле» в МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023 г, г. Москва

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата технических наук, 1 статья в издании перечня международной базы Web of Science и 1 статья в издании перечня международной базы Scopus.

Структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. В заключении отмечены результаты работы и представлены выводы. Работа изложена на 133 листах машинописного текста, содержит 75 рисунков, 5 таблиц, приложения.

Список литературы включает в себя 124 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, формулируется цель работы, ее актуальность, научная новизна и практическая значимость, отражены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертационной работы проведен обзор и анализ отечественных и зарубежных работ по направлениям повышения курсовой устойчивости и противодействия буксованию ведущих колес полноприводных автомобилей, как с ДВС, так и с тяговыми электромоторами, путем распределения подводимого к колёсам крутящего момента. Рассмотрены существующие алгоритмы управления, и отдельные методы, применяемые в этих алгоритмах. По рассматриваемой теме особенно отмечены работы следующих специалистов: Е.Е. Баулина, С.В. Бахмутов, В.А. Горелов, М.М. Жилейкин, А.В. Келлер, Г.О. Котиев, А.В. Круташов, Р.П. Кушвид, M. Klomp, V. Ivanov, T. Agliullin, L. De Novellis, J. Antunes.

В результате анализа было отмечено, что:

- задачи по противодействию буксованию ведущих колёс и повышению курсовой устойчивости путём распределения момента рассматриваются отдельно друг от друга;
- Регулирование момента рыскания может выполняться различными путями:
 - a. по ошибке скорости рыскания;
 - b. по ошибке угла дрейфа;
 - c. по ошибке отношения скоростей колёс;
- Метод противодействия буксованию зависит от способа подведения мощности к ведущим колёсам;
- Для отладки и первичной калибровки вновь разрабатываемой функции распределения момента необходима валидированная имитационная модель объекта управления.

-Существует проблема возникновения автоколебаний, решение которой в известных источниках приводится только для автомобилей, оснащенной межосевой муфтой.

-Не достаточно изучены методы распределения момента при движении в управляемом заносе.

Во второй главе диссертационной работы представлено описание разработанной имитационной модели криволинейного движения транспортного средства по недеформируемой опорной поверхности с двумя тяговыми электромоторами для исследования динамических свойств колесной машины и виртуального тестирования разрабатываемого алгоритма.

При разработке имитационной модели сформулированы следующие требования к модели:

- Модель должна учитывать совместную динамику кузова, силовой установки и ходовой части с достаточной точностью для проведения виртуальных заездов по недеформируемым грунтам;
- Модель взаимодействия колеса с опорным основанием должна обеспечивать неудерживающий характер, учитывать характеристики сцепления и сопротивления опорной поверхности.

Исходя из описанных требований собрана модель, описывающая 15 степеней свободы, определяющих состояние автомобиля, как представлено на рисунке 1:

- угол рыскания, продольный угол, угол крена;
- перемещение центра масс относительно трех осей;
- вертикальное перемещение шпинделей четырех колес;
- вращение четырех колес относительно шпинделя;
- перемещение рулевой рейки относительно поперечной оси.

Модель взаимодействия колеса с дорожным основанием представлена формулой Пасейки, которая обеспечивает предъявленные к модели требования. Эмпирические коэффициенты формулы Пасейки получены ФГУП «НАМИ» для целевого прототипа в рамках проекта ЕМП.

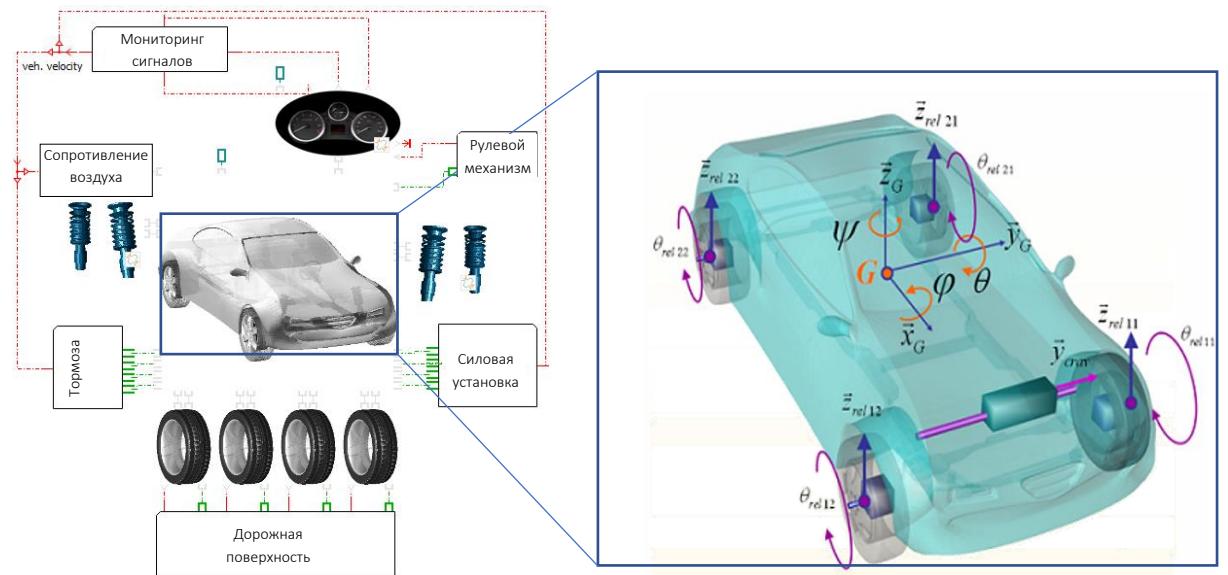


Рисунок 1 – Структура имитационной модели движения автомобиля

Вышеописанная модель, реализованная в Amesim после валидации может использоваться для тестирования в режиме MIL (model-in-the-loop - модель в цикле) разрабатываемых методов распределения момента, реализованных в Matlab-Simulink. Для этого в Amesim реализован режим ко-симуляции при котором симуляция модели автомобиля выполняется в решателе Amesim с переменным шагом, а модель управления выполняется в решателе Simulink с фиксированным шагом, соответствующим частоте целевого блока управления.

Для тестирования скомпилированного программного обеспечения на основе разработанных алгоритмов в режиме HIL (hardware-in-the-loop – аппаратное обеспечение в цикле) модельный комплекс реализован на стенде реального времени аппаратно-программируемого комплекса LabCar.

Для проверки адекватности модели были выполнены испытания на целевом прототипе, представленном на рисунке 2. Объект исследования – прототип гибридного водородно-электрического автомобиля проекта ЕМП ФГУП «НАМИ». Прототип оснащен двумя электромоторами, блоком управления с программным обеспечением на основе разработанных методов и необходимым для исследований измерительным оборудованием. Испытания выполнены на барабанном стенде и на дорогах полигона НИЦИАМТ, г.Дмитров, на сухом асфальте и мокром полимере

на автодроме ФСО, п. Старая Купавна. Результаты сравнения результатов выполненного и смоделированного манёвра «Переставка» на сухом асфальте представлены на графиках на рисунке 3. Сводная таблица сравнения испытаний и моделирования приведены в таблице 1.



Рисунок 2 – Прототип автомобиля на электротяге проекта ЕМП на полигоне ФСО

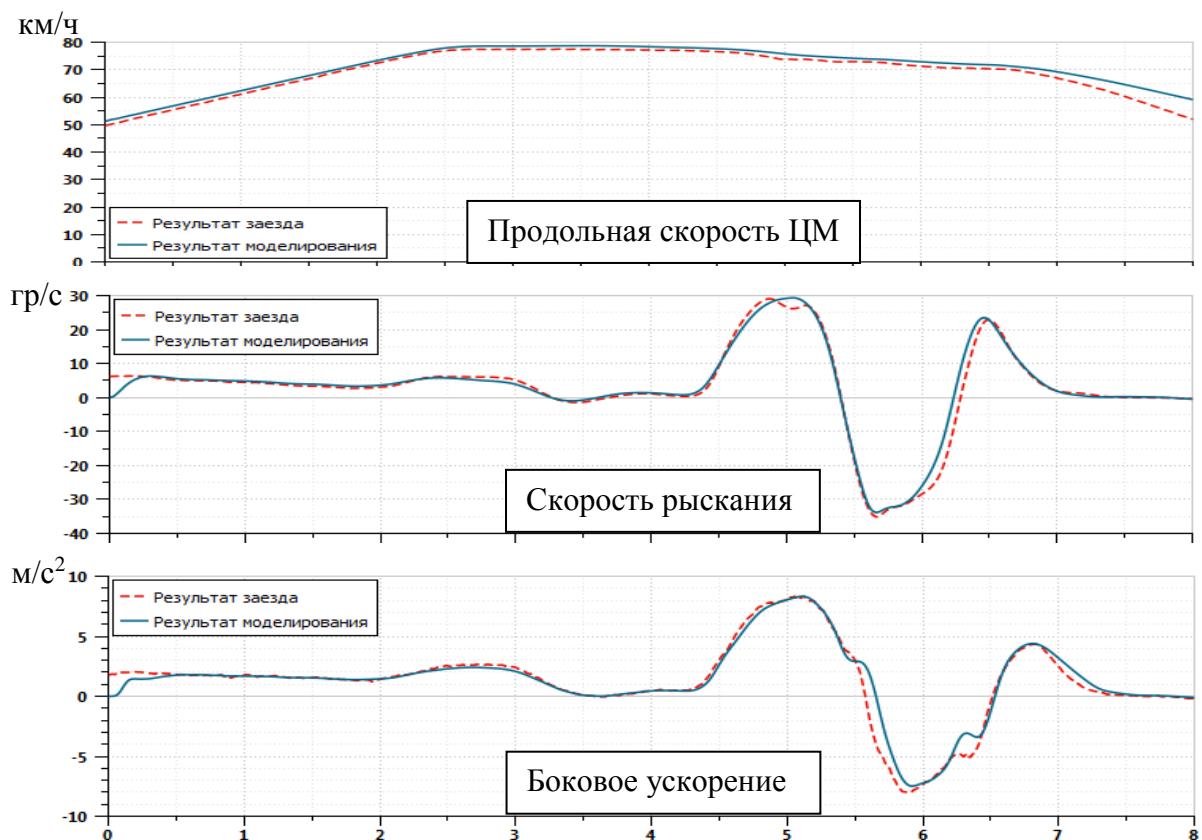


Рисунок 3 – Сравнение результатов по маневру «переставка» на сухом асфальте

Таблица 1.

Среднеквадратичная относительная ошибка результатов моделирования.

	Скорость ЦМ	Поперечное ускорение	Скорость рыскания
Цикл WLTC (Стенд)	2,1%	-	-
Траектория	2.5%	10.3%	5.4%
Переставка на сухом асфальте	2.4%	9.8%	9.1%
Переставка на мокром полимере	2.2%	11.9%	12.8%

На основе результатов испытаний созданного комплекса можно сделать вывод, что разработанный модельный комплекс пригоден для целей моделирования, в том числе для исследования, отладки и первичных калибровок алгоритма распределения крутящего момента по ведущим осям полноприводного электрического транспортного средства.

В третьей главе диссертационной работы предложена общая структура функции распределения момента, позволяющая путём активного перераспределение момента между осями электромобиля противодействовать возникновению буксования ведущих колёс, обеспечить целевой характер поворачиваемости и снижение риска потери курсовой устойчивости в повороте, включающая базовое распределение момента между ведущими осями электромобиля, регулирование скорости рыскания и пробуксовки и окончательное формирование момента для электромоторов передней и задней оси автомобиля.

Разработан комплексный метод противодействия буксованию колёс, на основе комбинированного регулятора, включающий функцию подавления автоколебаний крутящего момента. Комплексное противодействие буксованию базируется на методах снижения вероятности буксования ведущих колёс, автоматического обнаружения буксования ведущих колёс, и противодействия обнаруженному буксованию ведущих колёс.

Разработан комплексный метод повышения курсовой устойчивости, на основе комбинированного регулятора обеспечивающего целевую поворачиваемость автомобиля, и способствующего возвращению курсовой устойчивости в случаях сноса, заноса и контрповорота путём перераспределения

запроса момента между осями автомобиля. Комплексный метод повышения устойчивости включает в себя:

- метод снижения вероятности потери курсовой устойчивости;
- метод автоматического обнаружения потери курсовой устойчивости;
- метод стабилизации движения путём перераспределения момента между активными осями при потере курсовой устойчивости.

На рисунке 4 представлена структура функции, разработанная для реализации предложенных методов. Блок подготовки данных 1 конвертирует сигналы бортовых датчиков автомобиля в необходимые для расчета единицы измерения. Блок базового распределения 2 включает в себя регуляторы с прямой связью 3 и 4 для разделения запрашиваемого водителем момента $M_{вод}$ на базовые значения запроса момента для передней и задней оси $M_{БР_перед}$ и $M_{БР_зад}$ с целью решения задач снижения вероятности буксования ведущих колёс и потери курсовой устойчивости и повышение вероятности бокового сноса при возникновении бокового скольжения. Также регулятором 4 базового распределения настраивается целевой характер поворачиваемости автомобиля. Блок контроля скорости рыскания 5 включает в себя функцию обнаружения сноса/заноса и два регулятора: с обратной связью по ошибке скорости рыскания 6 и регулятор с прямой связью по положению руля 7, которые рассчитывают корректирующие значения $M_{КР_перед}$ и $M_{КР_зад}$. Блок контроля буксования 8 включает в себя функцию обнаружения буксования ведущих колёс и регулятор с обратной связью по ошибке разницы скоростей колёс 9, который рассчитывает корректирующие значения $M_{КП_перед}$ и $M_{КП_зад}$. Суммарные запросы моментов для передней и задней оси проверяются блоком внешних ограничений 10, который включает в себя в том числе и ограничения от систем TCS и ESC, после чего формируется окончательный запрос момента для переднего и заднего электромотора $M_{Пер}$ и $M_{Зад}$.



Рисунок 4 – Общая структура функции распределения момента.

Метод снижения вероятности буксования реализован при помощи регулятора с прямой связью, который распределяет момент пропорционально вертикальным реакциям на передней и задней оси, которые оцениваются по продольному ускорению центра масс автомобиля. Данный метод основан на том, что при неизвестных коэффициентах сцепления под передней и задней осью, вероятность возникновения буксования на передней или задней оси будет обратно пропорциональна соответствующим вертикальным реакциям.

Метод обнаружения буксования ведущих колёс основан на сравнении ожидаемой $\Delta_{V_{ож}}$ и измеренной $\Delta_{V_{изм}}$ разницы скоростей осей. Определение ожидаемой разницы скоростей осей в повороте выполняется при помощи эмпирически полученной поверхности отклика. При обнаружении буксования одной из активных осей, момент перераспределяется на небуксующую ось при помощи ПИД-регулятора, отличающимся включением в схему регулирования корректирующего звена для противодействия автоколебаниям. Метод обнаружения автоколебаний, основан на определении уровней колебаний на входе и выходе ПИД-регулятора.

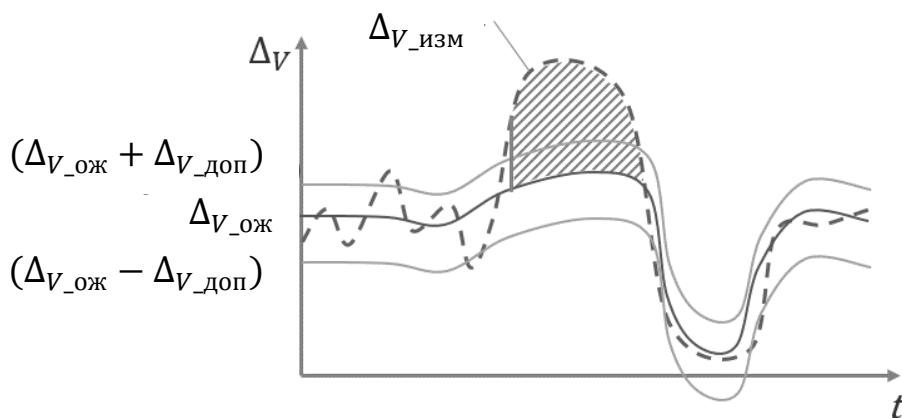


Рисунок 5 – Регистрация пробуксовки при криволинейном движении.

Метод снижения вероятности потери курсовой устойчивости основан на применении регулятора с прямой связью по боковому ускорению, который при помощи эмпирически полученной характеристики генерирует запрос на распределение момента, обеспечивающий целевой нейтральный характер поворачиваемости.

Метод определения состояния курсовой устойчивости автомобиля основан на сравнении ожидаемой $\omega_{z_{ож}}$ и измеренной $\omega_{z_{изм}}$ скорости рыскания. Ожидаемая скорость рыскания рассчитывается на основе сигналов скоростей колёс и положения руля, согласно выражению:

$$\omega_{z_{ож}} = V_x * \theta_{рул} * i_{рул} * \frac{1}{1+K_{пov}*V_x^2},$$

где:

$K_{\text{пов}}$ – константа, определяющая характер поворачиваемости автомобиля;

$i_{\text{рул}}$ – передаточное отношение рулевого механизма;

$\theta_{\text{рул}}$ – угол поворота руля;

V_x – продольная скорость автомобиля, которая определяется путём приведения измеренного значения скорости самого медленного колеса к центру масс автомобиля.

- Условие регистрации сноса: $|\omega_{z_{\text{ож}}}| - |\omega_{z_{\text{изм}}}| > \omega_{z_{\text{сн}}}$

- Условие регистрации заноса: $|\omega_{z_{\text{ож}}}| - |\omega_{z_{\text{изм}}}| < \omega_{z_{\text{зн}}}$

- Условие регистрации контрролерия:

$$|\omega_{z_{\text{ож}}} - \omega_{z_{\text{изм}}}| > \omega_{z_{\text{ктр}}} \quad \text{and} \quad \omega_{z_{\text{ож}}} * \omega_{z_{\text{изм}}} < 0, \text{ где}$$

$\omega_{z_{\text{сн}}}, \omega_{z_{\text{зн}}}$ и $\omega_{z_{\text{ктр}}}$ – экспериментально полученные пороговые значения ошибки скоростей рыскания, при достижении которых регистрируется состояние сноса, заноса и контрролерия соответственно.

При обнаружении сноса генерируется запрос на перераспределение момента на заднюю ось, а в случае обнаружения заноса или контрролерия на переднюю ось, на основе нового комплексного регулятора, включающего ПИД-регулирование по ошибке скорости рыскания и регулирование с прямой связью по сигналу положения руля.

В четвертой главе приведены результаты исследований работоспособности и эффективности предлагаемых в диссертационной работе методов, при помощи имитационного моделирования и натурных испытаний в составе автомобиля.

Для оценки эффективности метода противодействия буксованию ведущих колёс были выполнены старты с прямым рулём и полной педалью газа на ледяной поверхности озера. Результаты заездов представлены на рисунке 6. Применение предложенных методов противодействия буксованию показало снижение ошибки разницы скоростей на 92%.

Для оценки эффективности метода противодействия автоколебаниям смоделировано два старта – с выключенной и активной функцией противодействия

автоколебаниям. В качестве критерия эффективности выбрана накопленная усредненная среднеквадратичная ошибка разницы скоростей осей. Применение предложенного в диссертационной работе метода противодействия автоколебаниям приводит к снижению данной ошибки на 29,5%.

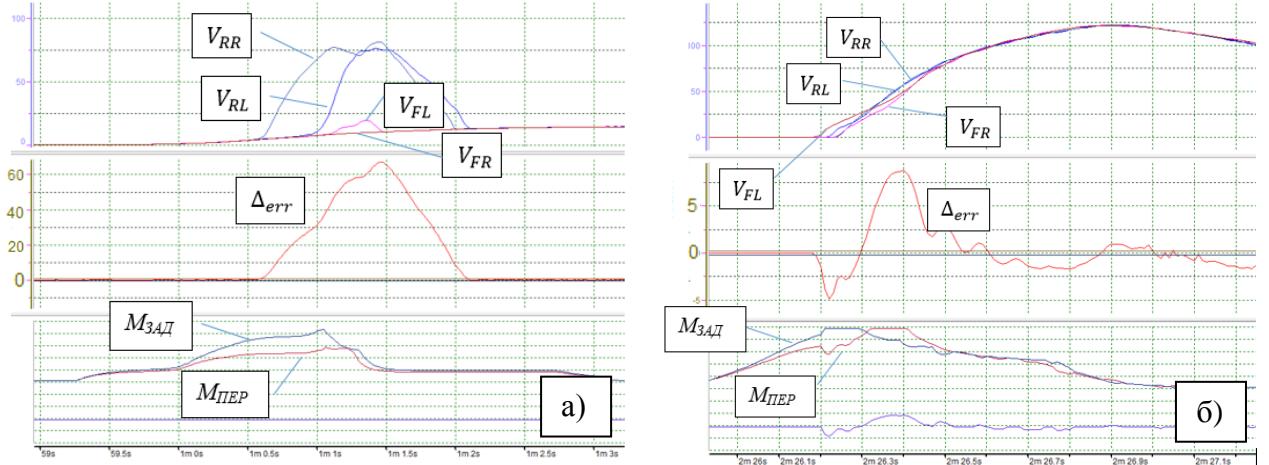


Рисунок 6 – Старт с полной педалью на ледяной поверхности. а) без активного противодействия буксованию б) с активным противодействием буксованию

По результатам испытательных заездов на треке с высоким коэффициентом сцепления установлено, что настройками разработанной функции распределения момента можно корректировать характеристику поворачиваемости автомобиля, как показано на рисунке 7. При помощи активного распределения момента снижен градиент характеристики поворачиваемости и расширена её линейная зона на 20%.

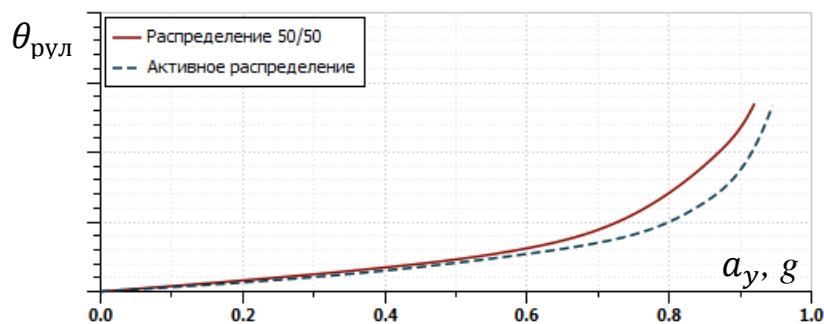


Рисунок 7 – Изменение характеристики поворачиваемости.

По результатам испытательных заездов на кольцевых участках с ледяной поверхностью установлено, что метод автоматической регистрации сноса, заноса и контрповорота работает адекватно и своевременно.

По результатам испытательных заездов на треке с ледяным покрытием и серии выполненных манёвров «Переставка» на мокром полимере, представленных на рисунке 8, установлено, что автомобиль с разработанной функцией повышения курсовой устойчивости имеет более высокие показатели управляемости и устойчивости по сравнению с постоянным распределением момента.



Рисунок 8 – Выполнение испытательных заездов:

а) заезд на ледяном треке, б) переставка на мокром полимере.

В качестве критерия эффективности распределения момента при прохождении трека, выбрана усредненная среднеквадратичная ошибка скорости рыскания. Применение активного распределения момента показало улучшение данного критерия на 8%. Для маневра «Переставка» в качестве критерия эффективности выбрана скорость успешного прохождения манёвра. Применение активного распределения момента при прохождении манёвра «Переставка» показало увеличение скорости прохождения на 7%.

Общие выводы и заключение

На основании проведенных в рамках данной работы исследований были разработаны, реализованы и испытаны методы распределения запрашиваемого момента между передней и задней осью двухосного электромобиля, которые позволяют повысить курсовую устойчивость полноприводного электромобиля и эффективно противодействовать буксованию ведущих колёс.

Для достижения этой цели были выполнены следующие задачи:

1. Разработана имитационная модель движения колесной машины с двумя электромоторами, учитываяющая инерционные и геометрические характеристики целевого прототипа, позволяющая на ранних стадиях реализации разрабатываемых алгоритмов выполнять тестирование предлагаемых методов и определять первичные эмпирические характеристики. Методами экспериментальных исследований установлено, что разработанная математическая модель адекватна, относительная усредненная среднеквадратическая погрешность находится в пределах: для скорости центра масс 2,5%, для поперечного ускорения 11.9%, для скорости рыскания 12.8%. Достигнутая точность позволяет использовать разработанную имитационную модель для исследования эффективности и отладки алгоритмов активного распределения момента.

2. Разработан и реализован комплексный метод противодействия буксованию ведущих колёс, включающий метод снижения вероятности буксования ведущих колёс, метод автоматического обнаружения буксования ведущих колёс и методов противодействия обнаруженному буксованию ведущих колёс. Предложенный метод основан на комбинации регулятора с прямой связью и регулятора с обратной связью по ошибке разницы скоростей осей, отличается от известных применением новой функции подавления автоколебаний, позволяющей повысить эффективность функции противодействия буксованию ведущих колёс.

3. Разработан и реализован комплексный метод повышения курсовой устойчивости, включающий метод снижения вероятности сноса и заноса, метод автоматического обнаружения сноса и заноса и метод противодействия сносу и заносу в случае обнаружения. Предложенный метод основан на сравнении целевой и измеренной скорости рыскания для обнаружения сноса, заноса и контрповорота, отличается от известных применением комбинации из регулятора с прямой связью по боковому ускорению, регулятора с обратной связью по ошибке скорости рыскания и регулятора с прямой связью по положению руля.

4. Для исследования эффективности предложенных методов выполнен ряд виртуальных и натурных испытаний. Виртуальные испытания выполнены в режиме ко-симуляции вычислительных комплексов Matlab Simulink и Siemens Amesim. Натурные испытания выполнены на прототипе автомобиля с электротягой проекта ЕМП на полигонах НИЦИАМТ, г.Дмитров и РОО «Лебёдушка», г.Тверь, и на автодромах ФСО, п. Старая Купавна и ADM Raceway, п.Мячково.

Результаты испытаний предложенных методов противодействия буксованию ведущих колёс показали, что реализованный на их основе алгоритм активного распределения момента позволяет снизить ошибку разницы скоростей осей на 92% на ледяной поверхности. Кроме того, при возникновении автоколебаний, применение разработанного в данной работе алгоритма подавления автоколебаний повышает эффективность противодействия буксованию ведущих колёс на 29,5%.

Результаты испытательных заездов на кольцевых участках с ледяной поверхностью показали, что метод автоматической регистрации сноса, заноса и контрповорота работает адекватно и своевременно.

Результаты испытательных заездов на подготовленном треке с ледяным покрытием и серия манёвров «Переставка» на мокром полимере показали, что при прохождении трека на управляемость с ледяным покрытием, активное распределение момента приводит к повышению показателя курсовой устойчивости на 8%, а при прохождении манёвра «Переставка» приводит к увеличению скорости прохождения манёвра на 7%.

Таким образом можно утверждать, что применение представленных в диссертации методов позволяет повысить уровень конкурентоспособности автомобиля за счет улучшения его эксплуатационных свойств, в частности повышения курсовой устойчивости. Представленный в диссертации комплекс методов разработан для электромобилей с индивидуальным приводом на каждую ось, однако с некоторыми изменениями может быть использован и в составе других типов двухосных транспортных средств, как с электроприводами, так и с ДВС с управляемыми системами распределения момента.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Заватский А.М., Харитонов С.А. Развитие алгоритмов активного распределения момента по осям легкового автомобиля // Труды НАМИ. – 2017. – № 2 (269). – С. 37–44. **Издание входит в перечень ВАК РФ.**

2. Заватский А.М., Харитонов С.А. Имитационное моделирование критических режимов, выявленных при эксплуатации систем автоматически подключаемого полного привода // Труды НАМИ. – 2018. – № 2 (273). – С. 26–34.

Издание входит в перечень ВАК РФ.

3. Заватский А.М., Харитонов С.А. Применение имитационного моделирования при разработке алгоритма управления системы активного полного привода. в сборнике: проблемы механики современных машин. материалы vii международной научной конференции. 2018. с. 139-144.

4. Заватский А.М., Малышев А. Н., Дебелов В. В., Келлер А. В. Математическая модель алгоритма распределения момента по осям электромобиля с двухмоторной схемой. // Известия МГТУ “МАМИ“. - 2023.

Издание входит в перечень ВАК РФ.

5. Zavatskii A.; Zavatskii M.; Veduta O. Applying Simulation for the Development of Active All-wheel-drive Systems. International journal of applied exercise physiology 2019. **Издание входит в перечень WoS.**

6. Dygalo V.G., Keller A.V., Zavatskiy A.M., HIL models formation principle in the design of automated vehicle braking system. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Automobile Scientific Forum, IASF 2019 "Technologies and Components of Land Intelligent Transport Systems". 2020. **Издание входит в перечень Scopus.**