

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертационную работу Умницына Артёма Алексеевича
«Повышение тормозной динамики электромобилей и гибридных
автомобилей, включающих в состав антиблокировочной системы
дисковые тормозные механизмы и электромашины», представленную
на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.05.03 - Колесные и гусеничные машины.

Актуальность диссертационной работы

Прогнозируемый на среднюю и дальнюю перспективу рост количества электромобилей и гибридных автомобилей создает предпосылки для изучения возможности увеличения функциональной нагруженности электромашин, используемых в приводе ведущих колес транспортных средств. Одним из возможных вариантов увеличения функциональной нагруженности является применение электромашин в качестве тормозных механизмов и исполнительных устройств антиблокировочной системы (АБС). Данная система относится к системам активной безопасности и служит для улучшения тормозных свойств автомобиля и его устойчивости и управляемости при торможении.

Электромашины, в сравнении с гидравлическим модулятором АБС, обладают высоким быстродействием и точностью задания тормозного момента на колесе. Применение электромашин в качестве исполнительных устройств АБС потенциально может увеличить эффективность действия АБС и повысить эффективность действия рабочей тормозной системы в целом. Работа Умницына А.А. посвящена данному вопросу. Таким образом выбранное направление диссертационного исследования является **актуальным**.

Оценка структуры и содержания работы

Представленная работа состоит из введения, пяти глав основного текста, общих выводов и рекомендаций, списка используемых источников и трех приложений. Общий объем работы составляет 200 страниц машинописного текста, включая 108 рисунков, 17 таблиц. Список источников содержит 109 наименований.

Во введении представлен краткий анализ изучаемой проблемы, отражена актуальность выбранной темы, а также научная новизна, методы исследований и практическая значимость работы. Автором обоснован выбор электромашин в качестве исполнительных устройств

антиблокировочной системы. Приведены материалы, выносимые на защиту, и изложена общая характеристика диссертационной работы.

В первой главе приводится подробный анализ научных работ, посвященных двум направлениям: 1) объединению и управлению исполнительными устройствами АБС, в качестве которых используется фрикционные тормозные механизмы и электромашины, установленные в приводе ведущих колес транспортных средств; 2) способам определения коэффициента проскальзывания колес, который соответствует максимальному коэффициенту сцепления шин с опорной поверхностью. В рамках работы данный коэффициент получил название целевой.

По результатам проведенного анализа научных работ в области рассматриваемой тематики автором формируется цель работы и задачи, которые необходимо решить.

Кроме того, формируется концепция управления исполнительными устройствами АБС, а именно автор предлагает использовать комбинацию из адаптивной экстремальной системы управления и системы управления на основе нечёткой логики. Также, по результатам проделанного анализа выделяется метод и алгоритм определения целевого коэффициента проскальзывания.

Во второй главе автором разработана комплексная математическая модель, позволяющая исследовать процесс торможения автомобиля с использованием АБС, в которой исполнительными устройствами являются фрикционные тормозные механизмы и электромашины, установленные в приводе ведущих колес транспортного средства. В данной главе процесс разработки комплексной модели разбит на описание более простых подмоделей.

Для учета продольного, поперечного и вертикального перемещения кузова автомобиля, а также его кренов относительно продольной, поперечной и вертикальной оси используется модель кузова с шестью степенями свободы.

Силы, возникающие в подвеске автомобиля, вычисляются как проекции на оси систем координат, связанных с центрами вращения колес автомобиля.

Модель рулевого управления создана с учетом только кинематических характеристик. Она связывает угол поворота рулевого колеса с перемещением рулевой рейки и углом поворота управляемых колес.

Для описания сил и моментов, возникающих в центре контакта колеса с опорной поверхностью, а также для нахождения самого центра контакта используется подход, предложенный Хансом Б. Пасейкой, и рекомендованная им «Magic formula».

Модель электромашины позволяет найти максимальный выходной крутящий момент на приводном вале исходя из текущей частоты его

вращения. Текущий момент на вале электромашины определяется интегрированием с использованием прямого метода Эйлера. Текущий момент, приложенный к колесу от электромашины, вычисляется с использованием передаточного числа редуктора.

Входным воздействием в математической модели тормозной системы является ход педали тормоза, а выходными значениями - тормозные моменты, приложенные к колесам автомобиля. В связи с принятыми допущениями данные тормозные моменты зависят только от давлений в колесных тормозных цилиндрах. Динамика изменения давления в гидравлических контурах рабочей тормозной системы с учетом работы гидравлического модулятора аппроксимирована передаточной функцией второго порядка.

В третьей главе приводится описание четырех вариантов алгоритма управления исполнительными устройствами антиблокировочной системы с возможностью управления гидравлическим модулятором и электромашинами, установленными в приводе ведущих колес автомобиля. Для функционирования предложенного алгоритма управления необходимо осуществлять определение текущего коэффициента проскальзывания и сцепления, а также целевого коэффициента проскальзывания, соответствующего максимальному коэффициенту сцепления, в каждый момент времени работы антиблокировочной системы.

Для определения текущего коэффициента проскальзывания и сцепления колес автомобиля автор воспользовался методом, предложенным в работе Semimlera S.

Для определения целевого коэффициента проскальзывания автором предложена модификация существующего метода. Отличием предложенного метода определения коэффициента проскальзывания от оригинального метода является следующее:

- введение временных задержек при первоначальном определении целевого коэффициента проскальзывания, а также при его резком изменении;

- введение зависимости изменения поискового коэффициента (K_s) от замедления транспортного средства, оснащенного силовым электроприводом.

Автором также предложена система управления тормозными исполнительными устройствами – гидравлическим модулятором и электромашинами, установленными в приводе ведущих колес. Система управления представляет собой комбинацию управления на основе принципа Ползунова-Уатта и нечеткой системы управления.

Основным исполнительным устройством, регулирующим коэффициент проскальзывания, является электромашина. Ошибка регулирования вычисляется как разность между целевым и текущим коэффициентом проскальзывания. Тормозной момент, который

необходимо реализовать на вале электромашины, рассчитывается при помощи ПИ-регулятора.

Зная отношение текущего тормозного момента от электромашины к максимально возможному, автор предлагает рассчитать доли нагрузки каждой электромашины. В соответствии с долей нагрузки, при помощи нечеткой логики, рассчитывается целевое давление, которое необходимо поддерживать в каждом колесном тормозном цилиндре.

С целью проведения исследования влияния нечетких правил, баз функциональной принадлежности сигнала ошибки и управляющего воздействия на эффективность торможения автомобиля автором предлагается четыре варианта правил и баз функциональной принадлежности сигнала ошибки и управляющего воздействия.

В четвертой главе приводятся результаты оценки точности работы созданной автором математической модели для исследования процесса торможения автомобиля путём сравнения данных моделирования с экспериментальными данными. Кроме этого, приводится оценка точности определения целевого коэффициента проскальзывания. Оценка проводится по двум метрикам: нормализированной среднеквадратической ошибке и абсолютной погрешности модели.

Оценка точности моделирования проведена при торможении на опорных поверхностях с высоким коэффициентом сцепления и на опорных поверхностях с низким коэффициентом сцепления. Также отдельно проведена оценка точности модели гидравлической части антиблокировочной системы.

При оценке точности модели движения транспортного средства при торможении на поверхности с высоким коэффициентом сцепления анализировалась скорость центра колеса, скорость автомобиля и замедление автомобиля. Стоит отметить, что среднеквадратическая ошибка при оценке скорости центра колеса составляет не более 3,03%, при оценке скорости автомобиля – 2,93%, а ускорения 7,26%.

Оценка точности модели шины при торможении на опорной поверхности с низким коэффициентом сцепления выполнялась путем сравнения продольной силы, полученной экспериментальным и расчётным путем. Среднеквадратическая ошибка при оценке продольной силы достигает 22,8% в диапазоне изменения коэффициента проскальзывания от 0 до 25%. В диапазоне от 4% до 25% среднеквадратическая ошибка снижается до 10,8%.

Оценка точности модели гидравлической части антиблокировочной системы выполнялась путем сравнения давления в контуре колесного тормозного механизма, полученного экспериментальным и расчётным путем. Среднеквадратическая ошибка при оценке достигает не более 6,61%.

В пятой главе автор проводил анализ эффективности экстренного торможения при работе антиблокировочной системы по предложенным

вариантам алгоритмов управления исполнительными устройствами. Оценка эффективности была выполнена в два этапа.

На первом этапе оценивалось выполнение требований, предъявляемых к работе АБС в Правилах ООН №13Н. Стоит отметить, что расчётное реализуемое сцепление при торможении на опорной поверхности с коэффициентом сцепления $\varphi=0,8$ достигает 0,994, а на поверхности $\varphi=0,2$ – 0,885.

На втором этапе эффективность торможения оценивалась по дополнительным критериям. Автором также приведена сравнительная оценка разработанных вариантов управления исполнительными устройствами АБС с АБС, в которой реализовано торможение только фрикционными тормозными механизмами. Также приведено сравнение эффективности действия тормозной системы при управлении гидравлическим модулятором и электромашинами по разработанному автором алгоритму с управлением по другому алгоритму. Предложенный автором третий вариант формирования базы функций принадлежности показывает наиболее высокую тормозную эффективность.

Заключение, сделанное по работе, отражает основные итоги работы и содержит обоснованные выводы.

Научная новизна полученных результатов

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основе проведённого анализа научных работ автором предложен метод и способ объединения гидравлического модулятора и электромашин, входящих в привод ведущих колес, в качестве исполнительных устройств АБС. Кроме того, автором предложен способ определения максимального коэффициента сцепления шин с опорной поверхностью.
2. Автором создан комплекс математических моделей, который позволяет исследовать процесс торможения колёсных транспортных средств, оснащённых АБС, при торможении фрикционными тормозными механизмами и электромашинами, установленными в приводе ведущих колес.
3. Предложены варианты нечетких правил и баз функциональной принадлежности сигнала ошибки и управляющего воздействия, составляющие важную часть разрабатываемого алгоритма управления исполнительными устройствами.
4. Усовершенствован существующий алгоритм определения целевого коэффициента проскальзывания, который соответствует максимальному коэффициенту сцепления.
5. Проведена расчётная оценка эффективности действия АБС колёсного транспортного средства категории М1, оснащённого разработанным

алгоритмом управления исполнительными устройствами, в соответствии с требованиями, изложенными в Правилах ООН №13Н.

6. Получены результаты сравнительной оценки эффективности торможения по дополнительным параметрам. Сравнительная оценка проведена для разработанных вариантов алгоритма управления исполнительными устройствами АБС и АБС, использующей другой алгоритм управления этими же исполнительными устройствами, а также АБС, использующей только фрикционные тормозные механизмы в качестве исполнительных устройств.

Практическая значимость полученных результатов

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в создании комплексной математической модели системы «автомобиль-колесо-дорога» и математической модели антиблокировочной системы, относящейся к электрогидравлическому типу. Предложенные автором математические модели и алгоритмы могут быть использованы в перспективных разработках гибридных автомобилей и электромобилей. Автором выполнен анализ эффективности действия предложенных алгоритмов в составе АБС в условиях, предусмотренных Правилами ООН №13Н.

Обоснованность правильности решения и достоверность

Обоснованность правильности решения и достоверность результатов исследования подтверждаются: корректностью применения теоретических аспектов движения автомобиля, автоматизированных систем автомобиля, а также численных методов вычислительной математики и математического моделирования. Кроме этого, достоверность результатов подтверждается сравнением экспериментальных данных с данными, полученными в результате математического моделирования.

Стоит отметить, что при проведении исследования использовался комплекс современного оборудования и программного обеспечения.

Проводимые экспериментальные исследования включали как виртуально-физические, так и физические эксперименты, достоверность которых подтверждена использованием поверенных измерительных средств.

Значимость для науки и практики

Диссертационная работа вносит достойный вклад в теорию и практику автомобилестроения:

1. Предложена новая методика формирования алгоритмов управления антиблокировочной системой, в которой исполнительными устройствами являются гидравлический модулятор и электромашины, установленные в приводе ведущих колес.
2. Предложен способ увеличения эффективности существующего алгоритма определения целевого коэффициента проскальзывания колес автомобиля, соответствующего максимальному коэффициенту сцепления.

Соответствие направления и темы диссертационных исследований пунктам паспорта научной специальности, соответствие автореферата ее содержанию.

Диссертационная работа полностью соответствует паспорту специальности 05.05.03 – «Колёсные и гусеничные машины», а именно пункту 2 «Математическое моделирование и исследование кинематики, статики и динамики, а также физико-химических процессов в транспортных средствах, их узлах и механизмах», и пункту 4 «Повышение качества, экономичности, долговечности и надежности, безопасности конструкции, экологических характеристик и других потребительских и эксплуатационных параметров транспортных средств».

Диссертация отличается логическим построением, написана техническим языком, достаточно иллюстрирована. По данным признакам она отвечает предъявляемым требованиям.

Автореферат диссертационной работы соответствует содержанию работы. А общая характеристика работы и приводимые выводы отражают соответствующие разделы диссертации.

Публикация результатов диссертации в научной печати.

Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 8 печатных работах, в том числе 4 в изданиях, входящих в международную базу Scopus, и 2 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Замечания по диссертационной работе.

Положительно оценивая рассматриваемую работу в целом, необходимо отметить несколько недостатков и замечаний:

1. В работе рассмотрено функционирование алгоритма управления АБС только при движении по ровной твердой опорной поверхности. Однако высока вероятность сбоев функционирования предложенного алгоритма при торможении на неровных опорных поверхностях (брускатка, крупный гравий, снежно-ледовые неровности). Подобные явления, возникающие на практике, в работе не исследовались.
2. Не приводится оценка вычислительных мощностей, которые необходимы для адекватной работы вариантов алгоритма в режиме реального времени.
3. В диссертации отсутствует оценка энергетической эффективности, то есть количества электрической энергии, которое возможно рекуперировать при осуществлении экстренного торможения со срабатыванием АБС, функционирующей по предложенным вариантам алгоритма управления исполнительными устройствами. Также нет оценки того, насколько уменьшится тепловая нагрузка на фрикционные тормозные механизмы.
4. В работе предложено четыре варианта формирования базы функций принадлежности, на основе которых построены алгоритмы управления с использованием математического аппарата нечёткой логики. Из них выбран наиболее эффективный вариант. Однако не приведено никаких методик, по которым сформированы эти варианты. Поэтому нет оснований считать, что не может быть сформирован ещё более эффективный вариант алгоритма управления.

Заключение

В целом, рассматриваемая диссертация является законченной квалификационной научно-исследовательской работой, выполненной лично автором, в которой решена актуальная научная задача по повышению тормозной динамики электромобилей и гибридных автомобилей, включающих в состав антиблокировочной системы фрикционные тормозные механизмы и электромашины. Достоверность заключения и выводов основана на теоретических разработках, данных, полученных при моделировании, и результатах экспериментальных исследований.

На основании вышеизложенного представленная к защите диссертационная работа Умницына Артёма Алексеевича на тему «Повышение тормозной динамики электромобилей и гибридных автомобилей, включающих в состав антиблокировочной системы фрикционные тормозные механизмы и электромашины» представляет собой исследовательскую научно-квалификационную работу, соответствующую п. 9 Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 №842 «О порядке присуждения учёных степеней», а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – «Колесные и гусеничные машины».

Кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Автомобили»
ФГБОУ ВО «Московский
автомобильно-дорожный
государственный технический
университет (МАДИ)»
Кристальный Сергей Робертович;
почтовый адрес: 125319, г. Москва,
Ленинградский проспект, д. 64
e-mail: sportauto@rambler.ru
Кандидатская диссертация по
специальности 05.05.03

Кристальный С. Р.

Кристальный С. Р.

Подпись *С.Р. Кристального* удостоверяю
документовед о/к *А.А. Марина*

