



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

УДК 629.3.017.5

С.В. БАХМУТОВ, д-р техн. наук, проф.
заместитель генерального директора по науке¹
E-mail: s.bakhmutov@nami.ru

А.А. УМНИЦЫН
инженер-конструктор 1-й категории управления «Комбинированные энергоустановки»
центра «Энергоустановки»¹
E-mail: artem.umnicin@nami.ru

¹ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», г. Москва, Российская Федерация

Поступила в редакцию 27.07.2022.

РАЗВИТИЕ АНТИБЛОКИРОВОЧНЫХ СИСТЕМ СОВРЕМЕННЫХ АВТОМОБИЛЕЙ, ВКЛЮЧАЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛИ И ГИБРИДНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА

В данной работе приводится аналитический обзор развития автомобильных антиблокировочных систем (АБС). Изложены некоторые исторические аспекты развития автомобильных АБС. Приводятся примеры алгоритмов управления исполнительными устройствами АБС, которые демонстрируют практическую реализацию различных методов управления. Показано изменение некоторых технических характеристик АБС и методов управления ими. Даются прогнозы развития антиблокировочных систем в ходе совершенствования автомобильного транспорта и перехода от традиционных автомобилей, имеющих только двигатель внутреннего сгорания, к гибридным автомобилям и электромобилям. Показан опыт ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» по созданию АБС с комбинированными исполнительными устройствами. Исследована возможность использования электрических машин привода ведущих колес для работы в составе исполнительных механизмов АБС. Разработаны алгоритмы совместного управления фрикционными тормозными механизмами и электромашинами. Проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований комбинированных исполнительных механизмов АБС, подтвердивших возможность улучшения тормозных характеристик автомобиля в различных дорожных условиях при экстренном торможении.

Ключевые слова: электромобиль, антиблокировочная система, комбинированный исполнительный механизм, алгоритмы управления, сравнительные оценки тормозных свойств

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-3-60-42-51>

Введение. Как известно, АБС представляет собой систему коррекции коэффициента проскальзывания колес автомобиля, действующую при торможении автомобиля в условиях высокой степени реализации сцепных свойств опорной поверхности. При этом основной целью работы АБС является сохранение управляемости и устойчивости автомобиля, а также уменьшение тормозного пути при экстренном торможении.

Коррекция коэффициента проскальзывания колес автомобиля выполняется в определенных пределах при помощи системы управления исполнительными устройствами АБС с использованием обратной связи. Для подобных систем характерно наличие объекта управления, чувствительного элемента (датчика), устройства сравнения, устройства управления и исполнительного устройства [1].

За более чем 65-летнюю мировую историю развития АБС они претерпели огромное количество изменений и улучшений.

Обзор первых конструкций АБС. Впервые в автомобилестроении данная система была установлена на автомобиль Lincoln Continental Mark II производства компании Ford Motor Company в 1954 году. Система имела большой вес, высокую стоимость, а также низкое быстродействие, что в конечном итоге привело к отказу от нее.

В 1969 году на автомобиле Ford Thunderbird и некоторых автомобилях Lincoln была применена новая версия антиблокировочной системы для колес задней оси, которая носила название Sure Brake. Система была построена на аналоговом блоке управления, объединяющем в единый модуль устройство сравнения и устройство управления. Исполнительным устройством являлся вакуумный модулятор, который был связан с колесными тормозными цилиндрами. Частота работы системы достигала всего лишь 4 Гц, в связи с чем тормозной путь, по сравнению с торможением без АБС, возрастал, но сохранялась устойчивость и управляемость на дорогах с низким коэффициентом сцепления.

В 1978 году компания Teldix совместно с Bosch и Benz установила на серийные автомобили трехконтурную АБС — два независимых контура управляли изменением давления в тормозных цилиндрах передних колес, а управление изменением давления в тормозных цилиндрах задних колес осуществлялось третьим контуром. Особенностью данной АБС было применение микроэлектронных устройств в блоке управления. Это нововведение уменьшило стоимость и вес системы, а также повысило ее быстродействие. Внешний вид системы показан на рисунке 1.

Принцип работы данной системы не отличается от принципа работы современных вариантов АБС: блок управления (2) получает информацию от датчиков скорости вращения передних (1) и задних (4) колес и на основе этой информации управляет исполнительными устройствами — клапанами, установленными в гидравлический модулятор (3).

В последующие годы инженеры компании Bosch провели работы по повышению тормоз-

ной эффективности, улучшению управляемости и устойчивости автомобилей при выполнении экстренного торможения с активацией АБС. Кроме этого, приводятся работы по снижению веса и добавлению таких новых функций, как электронное распределение усилий.

На сегодняшний день на большинстве новых серийных автомобилей применяется АБС компании Bosch девятого поколения. Она способна регулировать давления в колесных тормозных цилиндрах каждого колеса индивидуально с частотой до 10 Гц. Кроме того, по сравнению со своими предшественниками, данная система имеет низкую стоимость и малый вес. Внешний вид современного модуля антиблокировочной системы, включающей в свой состав как блок управления, так и исполнительные устройства, показан на рисунке 2.

Обзор современных АБС с возможностью управления только фрикционными тормозными механизмами. Наличие в современных АБС относительно мощных вычислительных устройств позволяет реализовывать разнообразные подходы в управлении гидравлическим модулятором АБС. Можно отметить большое количество работ, проводимых в ведущих мировых исследовательских центрах, направленных на улучшение работы АБС. Попытки улучшения работы АБС проводятся сразу по нескольким направлениям.

Во-первых, изучается возможность повысить эффективность управления клапанами, установленными в гидравлическом модуляторе. Например, в работе [4] предлагается способ управления на основе широтно-импульсной модуляции контроля положения электромагнитных клапанов гидравлического модулятора системы. В работе [5] предлагается применять специальные инструменты кусочно-линейного анализа для выявления проблемных мест алгоритма управления исполнительными устройствами и коррекции правил управления. Альтернативным подходом является реализация индивидуального антиблокировочного управления колесами на основе учета взаимного влияния колес каждой оси через перераспределение вертикальных реакций и взаимодействие колеса с опорной поверхностью [6].

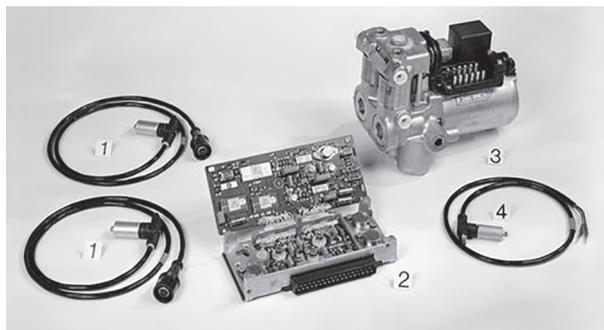


Рисунок 1 — Антиблокировочная система Teldix 1978 года [2]
Figure 1 — Teldix anti-lock braking system of 1978 [2]



Рисунок 2 — Внешний вид современной АБС [3]
Figure 2 — Appearance of modern ABS [3]

Во-вторых, изучается возможность определения оптимального коэффициента проскальзывания колес автомобиля и разработку методов поддержания проскальзывания колес вблизи оптимума данного коэффициента. Например, в работе [7] предлагается метод так называемого «скользящего режима» (Sliding Mode), суть которого заключается в поиске экстремума тормозной силы, приложенной к колесу. В работе [8] предлагается способ улучшения управляемости и устойчивости автомобиля при торможении с использованием АБС в случае движения по дороге с разным коэффициентом сцепления по бортам автомобиля. Авторы предлагают способ определения коэффициента сцепления для колес обоих бортов.

Третьим вариантом улучшения работы антиблокировочной системы является создание и изучение оригинальных конструкций исполнительного устройства системы. Подобным вариантом является электрогидравлическая тормозная система, получающая все большее распространение на современных автомобилях. Отличительной особенностью данного типа систем является разрыв гидравлической связи (при штатном режиме работы системы) между педалью тормоза и колесными тормозными цилиндрами. В данной системе применяется датчик положения педали тормоза по информации с которого происходит управление исполнительным устройством — гидравлическим модулятором, имеющем как правило 4 канала. При работе в режиме АБС данная система способна генерировать повышенное давление в гидравлических контурах, что приводит к увеличению частоты работы системы, которая может достигать 12 Гц [9]. Для подобного типа систем характерно отсутствие вакуумного усилителя тормозов, что создает дополнительные преимущества для гибридных автомобилей и электромобилей.

Обзор АБС с возможностью смешанного торможения. С учетом роста количества гибридных автомобилей и электромобилей, а также учитывая, что, по прогнозам ведущих консалтинговых агентств, процент новых электромобилей на рынках продаж к 2030 году достигнет 35–46 % [10], все больше исследовательских центров и компаний, занимающихся разработкой АБС, ищут пути увеличения эффективности экстренного торможения подобного типа автомобилей. Широкое распространение в исследованиях получает использование электромашин, установленных в приводе ведущих колес автомобилей, в качестве исполнительных устройств АБС. Стоит отметить, что изучается большое количество подходов в использовании электромашин в АБС. Например, в работе [11] предлагается алгоритм работы АБС автомобиля, оснащенного бесступенчатой трансмиссией. При этом в режиме срабатывания АБС торможение осуществляется с использованием как электромашин, так и фрикционных тормозных механиз-

мов. Авторы отмечают, что стандартный алгоритм работы АБС вызывает нежелательные колебания передаточного числа вариатора, который пытается поддерживать постоянной скорость вращения вала электромашин, работающей в режиме рекуперации. Для минимизации этого был разработан алгоритм, который позволяет распределить тормозное усилие между электромашинной и фрикционными тормозными механизмами. В работе [12] применяется итеративное обучение для осуществления управления исполнительными устройствами АБС. Тормозной момент, который должен быть реализован на колесах автомобиля, вычисляется как функция от скорости движения оптимального и текущего коэффициентов проскальзывания. Главным преимуществом предлагаемого подхода является высокая адаптируемость к различным дорожным условиям. Повышенная эффективность работы АБС по данному алгоритму достигается в условиях мокрой и обледенелой дороги. В работе [13] используется комбинация из системы управления на основе нечеткой логики и системы управления по принципу Ползунова–Уатта. Отличительной особенностью данного алгоритма является использование электромашин как основного источника создания тормозного момента. Фрикционные тормозные механизмы используются лишь для поддержания нагрузки на электромашин в оптимальных границах. Результаты исследований [9, 13] демонстрируют значительное уменьшение тормозного пути электромобилей на дорогах с низким коэффициентом сцепления при использовании электромашин в качестве исполнительных устройств АБС.

Обзор АБС с возможностью управления только электромашинными. В случае наличия электромашин, обладающих высоким тормозным моментом на выходном валу, становится возможным использовать в качестве исполнительных устройств АБС только электромашин. С учетом того факта, что электромашин в составе АБС позволяют корректировать тормозной момент с частотой, достигающей 20 Гц [14], а наличие только одного типа исполнительных устройств значительно упрощает алгоритм работы АБС, можно ожидать еще большего снижения тормозного пути, а также улучшения управляемости и устойчивости электромобилей. Стоит отметить, что уже известны работы в данной области. Например, в работе [15] авторы предлагают отказаться от гидравлической тормозной системы и датчиков скорости вращения колес. Стоит отметить, что алгоритм работы системы основан на правилах и подобен алгоритмам, применяемым на первых вариантах АБС, но за счет высокого быстродействия исполнительных устройств тормозная эффективность электромобилей находится на удовлетворительном уровне. А в работе [16] применяются два механизма торможения — рекуперативное и ко-

роткозамкнутое. Результаты работы демонстрируют возможность системы поддерживать коэффициент проскальзывания в узком диапазоне, что напрямую влияет на эффективность работы АБС.

Обзор работ ФГУП «НАМИ» в области создания АБС с комбинированным торможением. Актуальной и перспективной темой для изучения в среднесрочной перспективе является исследование АБС с реализацией комбинированного (смешанного) торможения. С одной стороны, это обосновано возможностью выпуска востребованного продукта (ввиду распространения гибридных автомобилей и электромобилей), с другой стороны, создается задел на будущее для реализации АБС на электромобилях, имеющих электромашины с высоким тормозным моментом.

Во ФГУП «НАМИ» как в ведущем научно-исследовательском институте Российской Федерации в области автомобилестроения данному вопросу уделяется достаточное внимание. С целью создания задела по данной тематике был разработан алгоритм управления исполнительными устройствами АБС с возможностью смешанного торможения. Математическое моделирование проводилось с использованием в программном комплексе MATLAB Simulink.

Алгоритм работы АБС с возможностью смешанного торможения. Главной целью созданного алгоритма управления исполнительными устройствами АБС с возможностью смешанного торможения является увеличение эффективности работы АБС: уменьшение тормозного пути, увеличение устойчивости и управляемости, а также повышение комфорта водителя и пассажиров в режиме экстренного торможения.

Реализацию созданного алгоритма можно разбить на два этапа:

- нахождение коэффициента проскальзывания, который соответствует максимальному коэффициенту сцепления колес с опорной поверхностью;
- исследование возможных алгоритмов управления исполнительными устройствами АБС.

Для определения коэффициентов сцепления и проскальзывания в режиме реального времени в работе используются методы, основанные на подходе, предложенном в научной работе [17].

Способ определения коэффициента проскальзывания, соответствующего максимальному коэффициенту сцепления колес. Тормозной путь автомобиля, как известно, зависит от продольной силы, которая может быть реализована на колесах транспортного средства.

Продольная сила, в свою очередь, зависит от коэффициента сцепления φ , который зависит от коэффициента проскальзывания s с локальным максимумом φ_{max} и соответствующим ему значению коэффициента проскальзывания s_{opt} (рисунок 3).

Точное определение коэффициента проскальзывания s_{opt} , называемого оптимальным коэф-

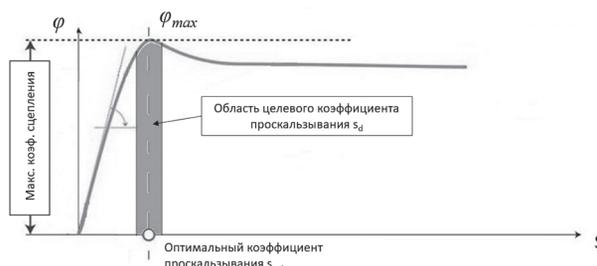


Рисунок 3 — Зависимость коэффициента сцепления φ от коэффициента проскальзывания s
Figure 3 — Dependence of the adhesion coefficient φ on the coefficient of slippage s

фициентом проскальзывания, является важной задачей. Поддержание текущего коэффициента проскальзывания s , близким к значению оптимального коэффициента проскальзывания s_{opt} , в течение экстренного торможения обеспечивает минимально возможный тормозной путь.

Для точного определения оптимального коэффициента проскальзывания s_{opt} целесообразно реализовать циклическое уточнение данного коэффициента. Для этого в процессе торможения автомобиля необходимо поддерживать колебания текущего коэффициента проскальзывания относительно оптимального значения. С этой целью необходимо ввести так называемый целевой коэффициент проскальзывания s_d , который должен меняться в области, близкой к значению оптимального коэффициента проскальзывания.

Определение целевого коэффициента проскальзывания s_d происходит согласно [18]. Процесс расчета данного коэффициента разбит на несколько частей (рисунок 4):

- расчет и определение кусочно-линейной функции кривой, которая описывает взаимозависимость коэффициента проскальзывания s и коэффициента сцепления φ ;
- первые 0,2 с работы АБС целевой коэффициент проскальзывания принимается равным целевому коэффициенту проскальзывания, вычисленному на момент выключения АБС в предыдущий раз;
- с 0,2 по 0,8 с работы АБС определение целевого коэффициента проскальзывания происходит согласно замедлению автомобиля;
- начиная с 0,8 с с момента задействования АБС определение оптимального коэффициента про-



Рисунок 4 — Алгоритм определения целевого проскальзывания
Figure 4 — Algorithm for determining intended slippage

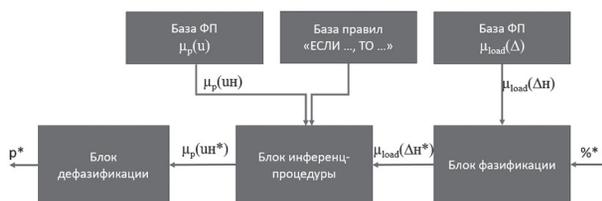


Рисунок 6 — Система управления на основе нечеткой логики, основанная на концепции Мамдани
 Figure 6 — Fuzzy logic based control system based on Mamdani concept

максимизации осуществляется переход от частных выводов к общему выводу, которому соответствует общая функция принадлежности $\mu_p(u)$.

Блок дефазификации отвечает за определение давления $P_d(t)$, которое необходимо реализовать на тормозном механизме. Дефазификация выполняется по методу центра тяжести.

База функций принадлежности основана на четырех термах: очень маленький (ОМ), маленький (М), большой (Б), очень большой (ОБ) и четырех соответствующих функций принадлежности. Лингвистическая переменная доли нагрузки описывается на рисунке 7.

Функция принадлежности $\mu_p(u)$, которая описывает целевое давление P_{ref} сформирована на базе функций принадлежности, состоящей из четырех термов: нулевое (0), маленькое (М), высокое (В), очень высокое (ОВ). Функции принадлежности, соответствующие данным термам, описываются на рисунке 8.

База правил содержит четыре правила:

1. Если доля нагрузки ОМ, тогда целевое давление 0.
2. Если доля нагрузки М, тогда целевое давление М.
3. Если доля нагрузки Б, тогда целевое давление В.
4. Если доля нагрузки ОБ, тогда целевое давление ОБ.

Исходя из баз правил, для каждого частного правила рассчитывается истинность вывода, которая определяется истинностью принадлежности доли нагрузки различным термам. Таким образом, системой нечеткой логики определяется целевое давление, которое необходимо поддерживать в гидравлическом контуре колесного тормозного цилиндра.

Анализ эффективности работы АБС с возможностью смешанного торможения. В данной работе рассматривается АБС, реализованная на электромобиле категории М1, имеющем индивиду-

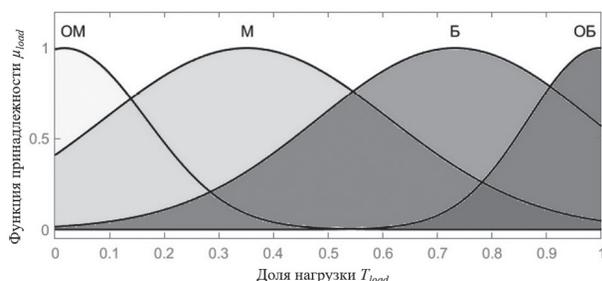


Рисунок 7 — Лингвистическая переменная доли нагрузки
 Figure 7 — Linguistic variable of the load share

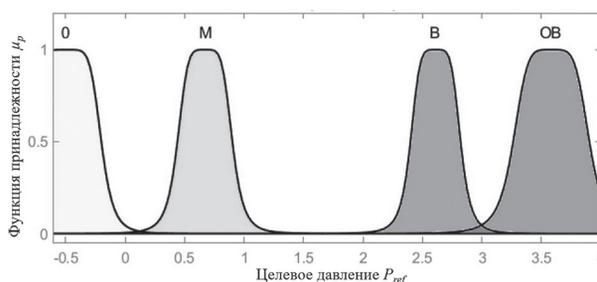


Рисунок 8 — Лингвистическая переменная целевого давления
 Figure 8 — Linguistic variable of target pressure

альный привод колес посредством электромоторов и тормозную систему электрогидравлического типа.

Ключевые характеристики транспортного средства приведены в таблице 1.

В рамках анализа эффективности работы АБС целесообразно рассмотреть два случая:

1. Выполнение минимальных требований, предъявляемых к эффективности торможения автомобилей, оборудованных АБС.
2. Сравнение работы предложенного алгоритма с алгоритмами, реализованными сторонними исследовательскими центрами.

Минимальные требования, предъявляемые к эффективности торможения автомобилей, оборудованных АБС, изложены в Правилах ООН № 13Н [19].

Согласно данному документу, АБС демонстрирует достаточную эффективность в случае, если реализуемое сцепление $\varepsilon > 0,75$ (то есть отношение максимального коэффициента торможения z_{al} к коэффициенту сцепления k_m):

$$\varepsilon = \frac{z_{al}}{k_m} \tag{2}$$

- По результатам математического моделирования:
- для торможения на дороге с коэффициентом сцепления шин с дорогой равным $\phi = 0,8$, $\varepsilon = 0,992$;
 - для торможения на дороге с коэффициентом сцепления шин с дорогой равным $\phi = 0,2$, $\varepsilon = 0,885$;

Кроме данного условия в Правилах отмечается недопустимость блокировки колес при работе АБС на скоростях выше 15 км/ч.

Изменение коэффициента проскальзывания колес автомобиля и скорости при торможении с использованием АБС при начальной скорости 120 км/ч и коэффициенте сцепления шин с доро-

Таблица 1 — Технические характеристики электромобиля категории М1
 Table 1 — Technical characteristics of the M1 electric vehicle

Полная масса, кг	2442
Передаточное число трансмиссии	10,5
Зависимость тормозного момента от давления в тормозной системе для передних колес, Н·м/МПа	407
Зависимость тормозного момента от давления в тормозной системе для задних колес, Н·м/МПа	173

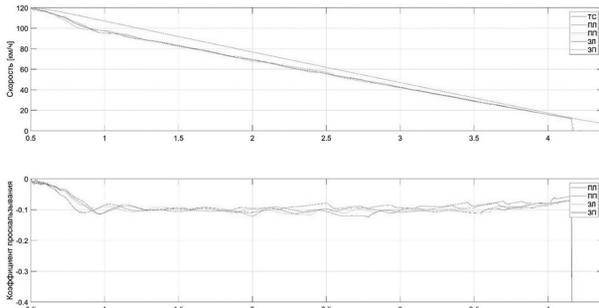


Рисунок 9 — Изменение скорости и коэффициента проскальзывания колес при торможении со скорости 120 км/ч и $\varphi = 0,8$

Figure 9 — Change in the speed and coefficient of wheel slippage when braking from a speed of 120 km/h and $\varphi = 0.8$

гой $\varphi = 0,8$ представлено на рисунке 9, при коэффициенте сцепления шин с дорогой $\varphi = 0,2$ — на рисунке 10, при ступенчатом изменении коэффициента сцепления с $\varphi = 0,8$ до $\varphi = 0,4$ — на рисунке 11, при ступенчатом изменении коэффициента сцепления с $\varphi = 0,4$ до $\varphi = 0,8$ — на рисунке 12, при различных коэффициентах сцепления по бортам автомобиля — на рисунке 13, а изменение угла поворота рулевого колеса при данном маневре — на рисунке 14.

Путем математического моделирования проведено сравнение эффективности торможения автомобиля с предлагаемым алгоритмом работы ABS и алгоритмами, предложенными в работе [9].

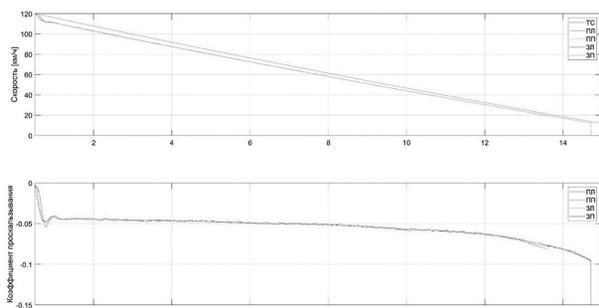


Рисунок 10 — Изменение скорости и коэффициента проскальзывания колес при торможении со скорости 120 км/ч и $\varphi = 0,2$

Figure 10 — Change in the speed and coefficient of wheel slippage when braking from a speed of 120 km/h and $\varphi = 0.2$

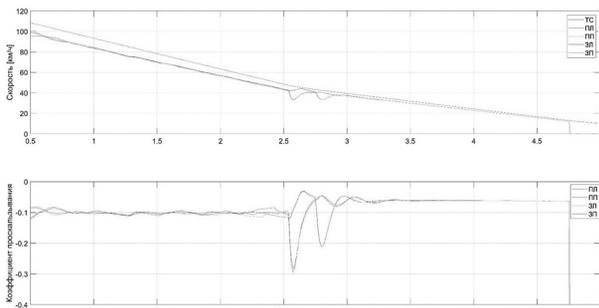


Рисунок 11 — Изменение скорости и коэффициента проскальзывания колес при торможении со скорости 120 км/ч и изменении коэффициента сцепления с $0,8$ до $0,4$

Figure 11 — Change in the speed and coefficient of wheel slippage when braking from a speed of 120 km/h and changing the coefficient of adhesion φ from 0.8 to 0.4

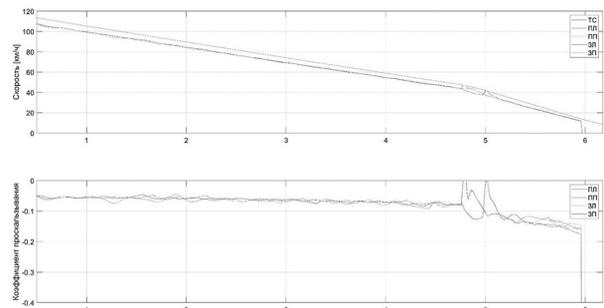


Рисунок 12 — Изменение скорости и коэффициента проскальзывания колес при торможении со скорости 120 км/ч и изменении коэффициента сцепления φ с $0,4$ до $0,8$.

Figure 12 — Change in the speed and coefficient of wheel slippage when braking from a speed of 120 km/h and changing the coefficient of adhesion φ from 0.4 to 0.8

В качестве показателей, оценивающих эффективность торможения, были использованы:

- среднее замедление электромобиля за время торможения;
- пройденная с момента начала торможения дистанция;
- индекс эффективности ABS (ABS index of performance — ABSIP).

Оценка эффективности алгоритмов управления исполнительными устройствами ABS проводилась по следующим параметрам:

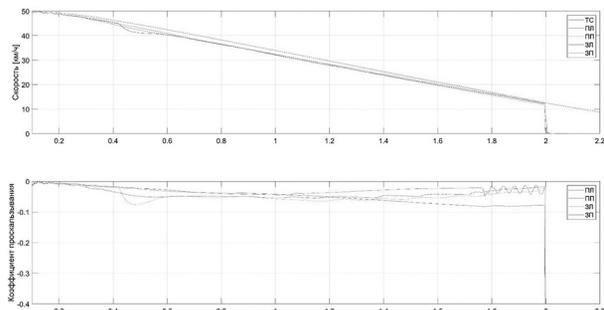


Рисунок 13 — Изменение скорости и коэффициента проскальзывания колес при торможении со скорости 50 км/ч и коэффициенте сцепления шин левого борта $\varphi = 0,8$, а правого — $\varphi = 0,4$

Figure 13 — Change in the speed and coefficient of wheel slippage when braking from a speed of 50 km/h and the coefficient of adhesion of the left-side tires $\varphi = 0.8$, and the right-side ones — $\varphi = 0.4$

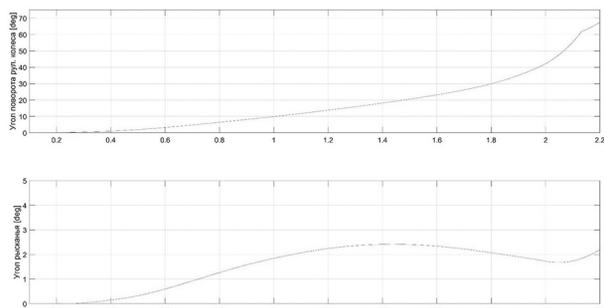


Рисунок 14 — Изменение угла поворота рулевого колеса и угла рыскания при торможении на различающемся по бортам автомобиля коэффициенте сцепления шин с дорогой

Figure 14 — Change in the steering wheel angle and yaw angle when braking on the coefficient of adhesion of tires to the road that differs along the sides of the car

Таблица 2 — Оценка эффективности работы АБС при торможении с 60 км/ч
Table 2 — Evaluation of the efficiency of the ABS when braking from 60 km/h

Вариант управления	Тормозные показатели			Показатели работы АБС				Jerk ITAE
	Тормозной путь, м	Среднее замедление, м/с ²	ABSIP	Средний коэффициент проскальзывания, %		Peak-to-peak value перед. ось, %	Peak-to-peak value зад. ось, %	
Вариант ФР	100,2	-1,43	1,40	ПЛ	-24	36	36	5,36
				ПП	-23			
				ЗЛ	-8			
				ЗП	-20			
Вариант TUIL	80,7	-1,87	1,74	ПЛ	-14	6	8	2,92
				ПП	-14			
				ЗЛ	-10			
				ЗП	-10			
Вариант НАМИ	78,43	-1,89	1,77	ПЛ	-29,27	0,21	0,25	1,49
				ПП	-29,24			
				ЗЛ	-29,24			
				ЗП	-29,22			

- средний коэффициент проскальзывания каждого колеса, полученный во время торможения;
- величина пикового значения регулирования коэффициента проскальзывания колес.

Комфорт водителя оценивается по параметру Jerk ITAE — абсолютному значению производной замедления, интегрированной и умноженной на время торможения.

В таблице 2 представлены результаты оценки эффективности АБС с дополнительными параметрами оценки при торможении со скорости 60 км/ч на мокром базальтовом покрытии. В данной таблице используется следующее обозначение вариантов управления:

- вариант ФР — торможение с использованием только фрикционных тормозных механизмов [9];
- вариант TUIL — торможение с использованием алгоритма управления АБС с возможностью смешанного торможения, который был разработан в рамках [9];
- вариант НАМИ — торможение с использованием алгоритма смешанного торможения, созданного во ФГУП «НАМИ».

На рисунке 15 отражена лепестковая диаграмма оценки эффективности работы АБС.

При использовании АБС с алгоритмом НАМИ, в сравнении с торможением только фрикционными тормозными механизмами, тормозной путь снижается на 21,73 м, что составляет 21,77 %, а замедление вырастает на 0,46 м/с² или 24,34 %. Кроме того, увеличивается индекс эффективности на 0,37 (20,74 %), уменьшается величина пикового значения регулирования коэффициента проскальзывания колес передней оси на 34,64, что составляет 96,2 %, а задней оси — 7,66 или 99,1 % и параметра Jerk ITAE на 5,29, что соответствует 98,69 %.

При сравнении алгоритма НАМИ с предложенным в работе [9], отмечается уменьшение тормозного пути на 2,27 м (2,81 %), а замедление

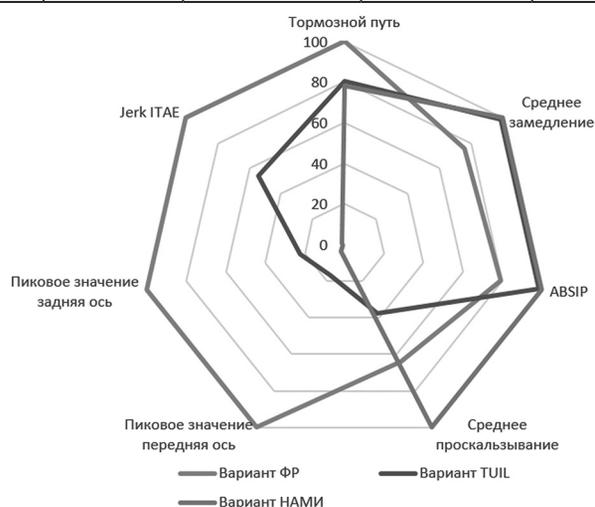


Рисунок 15 — Лепестковая диаграмма критериев оценки эффективности работы АБС
Figure 15 — Petal diagram of ABS performance evaluation criteria

увеличивается на 0,02 м/с² (6 %). Индекс эффективности при работе по алгоритму, предложенному НАМИ, больше на 0,03, что составляет 1,51 %, в то же время можно наблюдать уменьшение величины пикового значения регулирования коэффициента проскальзывания колес передней оси составляет 4,64 (77 %), а задней оси — 7,66 (96 %). Параметр Jerk ITAE при применении алгоритма НАМИ ниже на 2,85 или 97,6 % в сравнении с алгоритмом из работы [9].

Выводы. Таким образом, дальнейшие работы по совершенствованию АБС с большой долей вероятности будут проводиться по трем направлениям.

1. Совершенствование алгоритмов определения оптимального коэффициента проскальзывания колес автомобилей, который необходимо поддерживать при помощи исполнительных устройств. С учетом большого количества систем, связанных с работой АБС (адаптивный круиз-контроль, система курсовой устойчивости и другие),

а также постепенному распространению беспилотной техники, данному вопросу уделяется большое внимание и в ближайшей перспективе можно ожидать улучшения точности определения данного коэффициента при большом разнообразии режимов эксплуатации.

2. Совершенствование алгоритмов совместной работы фрикционных тормозных механизмов и электромашин, связанных с ведущими колесами автомобиля. Данный сценарий применим к гибридным автомобилям и автомобилям, имеющим маломощные электромашины. В среднесрочной перспективе данному вопросу с достаточно большой вероятностью будет уделяться повышенное внимание, что приведет к единому, наиболее эффективному способу управления исполнительными устройствами АБС.

3. В долгосрочной перспективе с распространением электромобилей, обладающих электромашинами с высокой выходной мощностью, можно ожидать улучшение работы не только АБС, но и смежных систем. Возможным путем развития является применение модульных конструкций систем активной безопасности и помощи водителю, основанных на ограниченном ряде исполнительных устройств и типов управлений.

Список литературы

- Власов, К.П. Теория автоматического управления / К.П. Власов. — Харьков: Гуманитарный центр, 2007. — 526 с.
- Mamdani, E.H. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller / E.H. Mamdani, S. Assilian // International Journal of Man-machine Studies. — 1975. — No. 7. — Pp. 1–13.
- Erjavec, J. Automotive Brakes / J. Erjavec. — Delmar Cengage Learning, 2003. — 471 p.
- Petrany, M. Anti-Lock Brakes, The First Technology to Help You Avoid a Crash, Turn 40 [Electronic resource] / M. Petrany. — Mode of access: <https://www.roadandtrack.com/car-culture/car-accessories/a22811340/anti-lock-brakes-the-first-technology-to-help-you-avoid-a-crash-turn-40/>. — Date of access: 16 07 2022.
- ABS module [Electronic resource]: Bosch. — Mode of access: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/driving-safety/abs-module/>. — Date of access: 16 07 2022.
- Dong-Woo, C. Control of Wheel Slip Ratio Using Sliding Mode Controller with Pulse Width Modulation / C. Dong-Woo, C. Seongho // Vehicle System Dynamics. — 1999. — No. 32. — Pp. 267–284.
- Wellstead, P.E. Analysis and redesign of an antilock brake system controller / P.E. Wellstead, N.B.O.L. Pettit // IEE Proc.-Control Theory Appl. — 1997. — Vol. 144, iss. 5. — Pp. 413–426.
- Рязанцев, В.А. Метод совершенствования управления антиблокировочной системой автомобиля при индивидуальном регулировании тормозных механизмов: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Рязанцев В.А. — М., 2019. — 166 с.
- ABS Control Using Optimum Search via Sliding Modes / S. Drakunov [et al.] // Proc. of 1994 33rd IEEE Conference on Decision and Control. — 1994. — Vol. 1. — Pp. 466–471. — DOI: <https://doi.org/10.1109/CDC.1994.411013>.
- Identification and Control of Split- μ Road for Antilock Braking System / F. Yang [et al.] // 2nd International Conference on Advanced Computer Control. — Shenyang, 2010. — Pp. 298–301. — DOI: <https://doi.org/10.1109/ICACC.2010.5486616>.
- The new paradigm of an anti-lock braking system for a full electric vehicle: experimental investigation and benchmarking / D. Savitski [et al.] // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. — 2016. — Vol. 230. — Pp. 1364–1377. — DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407015608548>.
- Digital Auto Report 2019 [Electronic resource]. — Mode of access: <https://www.strategyand.pwc.com/gx/en/insights/2019/digital-auto-report.html>.
- Bera, T.K. Bond graph model-based evaluation of a sliding mode controller for a combined regenerative and antilock braking system / T.K. Bera, K. Bhattacharya, A.K. Samantaray // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. — 2011. — Vol. 225, iss. 7. — Pp. 918–934. — DOI: <https://doi.org/10.1177/2041304110394558>.
- Zhang, J.L. Improvement of drivability and fuel economy with a hybrid antiskid braking system in hybrid electric vehicles / J.L. Zhang, C.L. Yin, J.W. Zhang // International Journal of Automotive Technology. — 2010. — Vol. 11, iss. 2. — Pp. 205–213. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-010-0026-0>.
- Mi, C. Iterative Learning Control of Antilock Braking of Electric and Hybrid Vehicles / C. Mi, H. Lin, Y. Zhang // IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY. — 2005. — Vol. 54, iss. 2. — Pp. 486–494. — DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2004.841552>.
- Умницын, А.А. Оценка выполнения требований действующих стандартов в вопросе эффективности антиблокировочной системы электромобиля с поддержкой смешанного торможения / А.А. Умницын, С.В. Бахмутов // Труды НАМИ. — 2022. — № 2. — С. 51–59. — DOI: <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2022-2-51-59>.
- Fujimoto, H. Motion Stabilization Control of Electric Vehicle under Snowy Conditions Based on Yaw-Moment Observer / H. Fujimoto, T. Saito, T. Noguchi // Engineering, Mathematics: IEEE International Workshop on Advanced Motion Control. — 2004. — Pp. 35–40. — DOI: <https://doi.org/10.1109/AMC.2004.1297637>.
- Control Strategy for ABS of EV with Independently Controlled Four In-wheel Motors / Y. Zhou [et al.] // 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. — 2009. — Pp. 2471–2476. — DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2009.5138647>.
- Chun-Liang, L. ABS Control Design for Two-Wheel Drive Electric vehicles / L. Chun-Liang // Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. — 2011. — Pp. 1011–1014. — DOI: <https://doi.org/10.1109/MACE.2011.5987104>.
- Semmler, S. Regelung der Fahrzeugbremsdynamik mit kontinuierlich einstellbaren Radbremsen: a dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy / S. Semmler. — Düsseldorf, 2006.
- Bakhmutov, S.V. Intelligent anti-lock braking system of electric vehicle with the possibility of mixed braking fuzzy logic / S.V. Bakhmutov, A.A. Umnitsyn // Journal of Physics Conference Series. — 2021. — Vol. 2061. — DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2061/1/012101>.
- Единые предписания, касающиеся официального утверждения механических транспортных средств категорий М, N и O в отношении торможения: ГОСТ Р 41.13-99. — Введ. 01.07.2000. — М.: ИПК Издательство стандартов. — 116 с.

BAKHMUTOV Sergey V., D. Sc. in Eng., Prof.
Deputy CEO for Science (Research)¹
E-mail: s.bakhmutov@nami.ru

UMNITSYN Artem A.

First Category Design Engineer of the Department “Combined Powerplants” of the Center “Powerplants”¹
E-mail: artem.umnitsyn@nami.ru

¹FSUE “NAMI”, Moscow, Russian Federation

Received 25 July 2022.

DEVELOPMENT OF ANTI-LOCK BRAKING SYSTEMS OF MODERN CARS, INCLUDING ELECTRIC VEHICLES AND HYBRID VEHICLES

The article provides an analytical overview of the development of automotive anti-lock braking systems (ABS). Some historical aspects of the development of automotive ABS are described. Examples of control algorithms for ABS actuators are given, which demonstrate the practical implementation of various control methods. The change of some technical characteristics of ABS and methods of their control is shown. Predictions are given for the development of anti-lock braking systems in the course of improving road transport and the transition from traditional cars with only an internal combustion engine to hybrid cars and electric vehicles. The experience of the FSUE "NAMI" is shown on the creation of ABS with combined actuators. The possibility of using electric drive machines for driving wheels to work as part of ABS actuators is investigated. Algorithms of joint control of friction braking mechanisms and electric machines have been developed. A set of theoretical and experimental studies of combined ABS actuators has been carried out, confirming the possibility of improving the braking characteristics of a car in various road conditions during emergency braking.

Keywords: electric vehicle, anti-lock braking system, combined actuator, control algorithms, comparative evaluation of braking properties

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-3-60-42-51>

References

- Vlasov K.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control]. Kharkiv, Gumanitarnyy tsentr Publ., 2007. 526 p. (in Russ.).
- Mamdani E.H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, 1975, vol. 7, iss. 1, pp. 1–13.
- Erjavec J. *Automotive brakes*. Delmar Cengage Learning, 2003. 471 p.
- Petrany M. *Anti-lock brakes, the first technology to help you avoid a crash, turn 40*. 2018. Available at: <https://www.road-and-track.com/car-culture/car-accessories/a22811340/anti-lock-brakes-the-first-technology-to-help-you-avoid-a-crash-turn-40/> (accessed 16 July 2022).
- ABS module. Available at: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/driving-safety/abs-module/> (accessed 16 July 2022).
- Choi S., Cho D.-W. Control of wheel slip ratio using sliding mode controller with pulse width modulation. *Vehicle system dynamics*, 1999, vol. 32, iss. 4–5, pp. 267–284.
- Wellstead P.E., Pettit N.B.O.L. Analysis and redesign of an anti-lock brake system controller. *IEE Proceedings – Control theory and applications*, 1997, vol. 144, iss. 5, pp. 413–426.
- Ryazantsev V.A. *Metod sovershenstvovaniya upravleniya antiblokirovochnoy sistemoy avtomobilya pri individualnom regulirovaniy tormoznykh mekhanizmov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Method of improving the control of the anti-lock braking system of the car with individual regulation of braking mechanisms. Ph. D. Thesis]. Moscow, 2019. 166 p. (in Russ.).
- Drakunov S., Ozguner U., Dix P., Ashrafi B. ABS control using optimum search via sliding modes. *Proceedings of 1994 33rd IEEE Conference on decision and control*. Lake Buena Vista, 1994, vol. 1, pp. 466–471. DOI: <https://doi.org/10.1109/CDC.1994.411013>.
- Fang Y., Chu L., Shang M., Zhou F., Guo J. Identification and control of split- μ road for antilock braking system. *Proc. 2010 2nd International conference on advanced computer control*. Shenyang, 2010, pp. 298–301. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICACC.2010.5486616>.
- Savitski D., Ivanov V., Augsburg K., Shyrokau B., Wragge-Morley R., Pütz T., Barber P. The new paradigm of an anti-lock braking system for a full electric vehicle: experimental investigation and benchmarking. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part D: Journal of automobile engineering*, 2016, vol. 230, iss. 10, pp. 1364–1377. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407015608548>.
- Digital auto report 2019*. Available at: <https://www.strategand.pwc.com/gx/en/insights/2019/digital-auto-report.html>.
- Bera T.K., Bhattacharya K., Samantaray A.K. Bond graph model-based evaluation of a sliding mode controller for a combined regenerative and antilock braking system. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part I: Journal of systems and control engineering*, 2011, vol. 225, iss. 7, pp. 918–934. DOI: <https://doi.org/10.1177/2041304110394558>.
- Zhang J.L., Yin C.L., Zhang J.W. Improvement of drivability and fuel economy with a hybrid antiskid braking system in hybrid electric vehicles. *International journal of automotive technology*, 2010, vol. 11, iss 2, pp. 205–213. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-010-0026-0>.
- Mi C., Lin H., Zhang Y. Iterative learning control of antilock braking of electric and hybrid vehicles. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2005, vol. 54, iss. 2, pp. 486–494. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2004.841552>.
- Umnitsyn A.A., Bakhmutov S.V. Otsenka vypolneniya trebovaniy deystvuyushchikh standartov v voprose effektivnosti antiblokirovochnoy sistemy elektromobilya s podderzhkoy smeshannogo tormozheniya [Evaluation of compliance with the current standards requirements regarding the anti-lock braking system effectiveness of an electric vehicle with mixed braking support]. *Trudy NAMI*, 2022, no. 2, pp. 51–59. DOI: <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2022-2-51-59>.
- Fujimoto H., Saito T., Noguchi T. Motion stabilization control of electric vehicle under snowy conditions based on yaw-moment observer. *Proc. the 8th IEEE International workshop on advanced motion control*. Kawasaki, 2004, pp. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.1109/AMC.2004.1297637>.
- Zhou Y. Control strategy for ABS of EV with independently controlled four in-wheel motors. *Proc. 2009 4th IEEE Conference on industrial electronics and applications*. Xi'an, 2009, pp. 2471–2476. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2009.5138647>.
- Lin C.-L., Lin W.-C. ABS control design for two-wheel drive electric vehicles. *Proc. Second international conference on mechanic automation and control engineering*. Inner Mongolia, 2011, pp. 1011–1014. DOI: <https://doi.org/10.1109/MACE.2011.5987104>.
- Semmler S. *Regelung der Fahrzeugbremsdynamik mit kontinuierlich einstellbaren Radbremsen*. Ph. D. Thesis. Düsseldorf, 2006.
- Umnitsyn A.A., Bakhmutov S.V. Intelligent anti-lock braking system of electric vehicle with the possibility of mixed braking using fuzzy logic. *Journal of physics: conference series*, 2021, vol. 2061. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2061/1/012101>.
- State Standard R 41.13-99. *Edinoobraznye predpisaniya kasa-yushchiesya ofitsialnogo utverzhdeniya transportnykh sredstv v otnoshenii tormozheniya* [Uniform provisions concerning the approval of vehicles of categories M, N and O with regard to braking]. Moscow, IPK standartov Publ., 2000 (in Russ.).