

ОБОБЩЁННАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕАЛИЗУЕМОГО ПРОДОЛЬНОГО ЗАМЕДЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ С УЧЁТОМ СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЁС, ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ТОРМОЗОВ И РАБОТЫ СИСТЕМ ABS/EBD

Р.А. Давлатшоев, Б.Ж. Мажитов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

В статье представлена обобщённая аналитическая модель реализуемого продольного замедления автомобиля, учитывающая одновременно температурный фэйдинг тормозных механизмов, сцепные свойства дорожного покрытия, динамическое перераспределение вертикальных нагрузок и работу электронных систем ABS/EBD. Показано, что реализуемое замедление определяется минимумом между тормозной способностью системы и пределом сцепления шин с дорогой. Проведён численный расчёт для автомобиля Mercedes W211 на уклоне 5°, учитывающий нагрев тормозов. Полученные результаты демонстрируют существенное влияние фэйдинга тормозов на эффективность торможения и подчёркивают ограниченные возможности электронных систем безопасности по компенсации снижения тормозной силы.

Ключевые слова: реализуемое замедление, тормозная система, фэйдинг, сцепление колёс с дорогой, ABS, EBD, динамическое перераспределение нагрузок.

МОДЕЛИ УМУМИИ АНАЛИТИКИИ СУСТШАВИИ ТЎЛИИ ВОҶЕИИ АВТОМОБИЛ БО ДАРНАЗАРДОШТИ ЧАСПИШИ ЧАРҲҶО БО РОҲ, ҲОЛАТИ ГАРМИИ МЕХАНИЗМҲОИ БОЗДОРӢ ВА КОРИ СИСТЕМАҲОИ ABS/EBD

Р.А. Давлатшоев, Б.Ж. Мажитов

Дар мақола модели умумии таҳлилии суштшавии тўлии воқеии автомобил пешниҳод карда шудааст, ки ҳамзамон таъсири фэйдинги ҳароратии механизмҳои боздорӣ, хусусиятҳои ҳолати рӯйпӯши роҳ, аз нав тақсимшавии динамикии сарбории амудӣ ва кори системаҳои электронии ABS/EBD-ро ба назар мегирад. Нишон дода шудааст, ки суштшавии воқеии автомобил аз омиле вобаста аст, ки киматаш байни қобиляти системаи боздорӣ ва ҳудуди часпиши шинаҳо бо роҳ камтар мебошад. Ҳисобкунии ададӣ барои автомобили Mercedes W211 дар нишебии 5° бо дарназардошти гармшавии механизмҳои боздорӣ амалӣ карда шудааст. Натиҷаҳои бадастомада таъсири фэйдинги механизмҳои боздориро ба самаранокии системаи боздорӣ нишон дода, маҳдудияти системаҳои электронӣ дар ҷуброн намудани қоҳиши қувваи боздориро таъкид мекунад.

Калидвожаҳо: суштишавии воқеӣ, системаи боздорӣ, фэйдинг, часпиши чарҳҷо бо роҳ, ABS, EBD, аз нав тақсимшавии динамикии сарборӣ.

A GENERALIZED ANALYTICAL MODEL OF REALIZABLE LONGITUDINAL VEHICLE DECELERATION CONSIDERING TIRE-ROAD ADHESION, BRAKE THERMAL STATE, AND ABS/EBD SYSTEM OPERATION

R.A. Davlatshoev, B.Zh. Mazhitov

The paper presents a generalized analytical model of realizable longitudinal vehicle deceleration that simultaneously accounts for thermal fading of brake mechanisms, adhesion properties of the road surface, dynamic redistribution of vertical loads, and the operation of electronic ABS/EBD systems. It is shown that the realizable deceleration is determined by the minimum of the braking capability of the system and the tire-road adhesion limit. A numerical simulation for a Mercedes W211 vehicle on a 5° slope, taking brake heating into account, is carried out. The obtained results demonstrate the influence of brake fading on braking efficiency and emphasize the limited ability of electronic safety systems to compensate for the reduction in braking force.

Keywords: realizable deceleration, braking system, brake fade, tire-road adhesion, ABS, EBD, dynamic load redistribution.

Введение

Продольная динамика автомобиля при торможении определяется двумя фундаментальными физическими ограничениями: возможностью тормозной системы развивать тормозной момент и пределом сцепления в системе «шина–дорога». Даже при высокой эффективности тормозной системы фактическая тормозная сила, развиваемая на колесе, не может превышать предельную силу сцепления с дорожным покрытием:

$$F_{\text{сц},i} = \varphi \cdot R_{z,i},$$

где φ — коэффициент сцепления шины с дорогой, зависящий от типа и состояния покрытия (сухое, мокрое, обледенелое), степени загрязнения и микрорельефа [9], а $R_{z,i}$ — нормальная (вертикальная) реакция дороги на i -ю ось или колесо. Это ограничение является чисто физическим

и не зависит от конструктивных возможностей тормозной системы, отражая фундаментальный принцип продольной динамики автомобиля: превышение тормозного момента сверх сцепных возможностей приводит к блокированию колёс и скольжению, а не к росту замедления [1, 2].

Одним из ключевых факторов, влияющих на реализуемое тормозное усилие, является тепловой фэйдинг тормозных механизмов. При интенсивном торможении температура тормозных дисков и колодок может достигать критических значений ($T > 250-300\text{ }^{\circ}\text{C}$), что приводит к снижению коэффициента трения $\mu(T_i)$ [6, 7] и, соответственно, тормозной силы на колесе независимо от сцепления шин с дорогой [3].

Таким образом, физически корректная оценка продольного замедления [10-12] автомобиля требует одновременного учёта следующих факторов:

1. Ограничений, накладываемых сцепными свойствами системы «шина–дорога»;
2. Изменения коэффициента трения тормозных механизмов в зависимости от их теплового состояния;
3. Динамического перераспределения вертикальных нагрузок при торможении, влияющего на предел сцепления каждой оси;
4. Функционирования электронных систем активной безопасности (ABS/EBD), регулирующих тормозные силы и предотвращающих блокирование колёс [4, 5].

Предлагаемая в статье обобщённая модель реализуемого продольного замедления автомобиля формализует все перечисленные факторы и позволяет количественно оценивать пределы эффективности торможения при реальных условиях эксплуатации.

Научная новизна работы заключается в формализации реализуемого продольного замедления автомобиля в виде обобщённой аналитической модели, учитывающей перечисленные факторы в рамках единого математического описания.

Исследовательская часть

Формализация модели реализуемого замедления

Продольное замедление автомобиля целесообразно определять через оператора минимума:

$$j_3^t = \frac{1}{m_a} \cdot \sum_{i=1}^2 \min [\mu(T_i) \cdot R_{z,i}(j_3^t), \varphi \cdot R_{z,i}(j_3^t)] - g \cdot \sin\alpha, \quad (1)$$

где j_3^t — замедление с учётом температуры, $\min[\dots]$ — оператор, учитывающий, что тормозное усилие ограничено либо сцеплением, либо конструктивной возможностью тормозов, $R_{z,i}(j_3^t)$ — вертикальная реакция на i -й оси ($i=1$ — передняя ось, $i=2$ — задняя ось), зависящая от перераспределения нагрузок при торможении [8].

$$R_{z1}(j_3^t) = \frac{m_a \cdot g}{L} \cdot \left(b \cdot \cos\alpha + \frac{h_{ц.м.} \cdot j_3^t}{g} + h_{ц.м.} \cdot \sin\alpha \right), \quad (2)$$

$$R_{z2}(j_3^t) = \frac{m_a \cdot g}{L} \cdot \left((L - b) \cdot \cos\alpha - \frac{h_{ц.м.} \cdot j_3^t}{g} - h_{ц.м.} \cdot \sin\alpha \right) \quad (3)$$

Остальные параметры, используемые в формулах (1) - (3), приведены в таблице 1.

Такое представление обеспечивает корректное моделирование как режима, ограниченного сцеплением шин, так и режима фэйдинга тормозов.

Влияние систем ABS и EBD

Антиблокировочная система тормозов (ABS) поддерживает работу тормозного процесса на границе сцепления $\mu(T_i) \approx \varphi$, предотвращая блокирование колёс. Электронная система распределения тормозных усилий (EBD) перераспределяет тормозные силы между осями в зависимости от изменения вертикальных нагрузок, обеспечивая максимально возможное суммарное замедление при сохранении курсовой устойчивости.

В условиях перегрева тормозов ($\mu(T_i) < \varphi$) эффективность ABS/EBD ограничена и не компенсирует снижение тормозной силы.

Численный расчёт торможения Mercedes W211 на уклоне

Численный расчёт торможения автомобиля Mercedes W211 на уклоне выполнен на основе исходных данных [8], представленных в таблице 1.

Таблица 1-Исходные параметры автомобиля Mercedes W211, используемые для расчёта реализуемого сцепления

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения	Примечание
Масса автомобиля	m_a	1700	кг	Снаряжённая масса
Колёсная база	L	2,85	м	Расстояние между осями
Расстояние от передней оси до центра масс	b	1,35	м	Используется для расчёта вертикальных нагрузок
Высота центра масс	$h_{ц.м.}$	0,55	м	Влияет на перераспределение нагрузок при торможении
Коэффициент трения тормозов на передней оси [7]	$\mu(T_1)$	0,30	—	Учёт нагрева тормозов (фейдинг)
Коэффициент трения тормозов на задней оси [7]	$\mu(T_2)$	0,35	—	Учёт нагрева тормозов (фейдинг)
Коэффициент сцепления с сухой дорогой	φ	0,7	—	Максимально возможное сцепление шин
Ускорение свободного падения	g	9,81	м/с ²	Физическая константа
Уклон дороги	α	5	(⁰), градус.	Продольный угол уклона (пример: горный спуск)

Вертикальные реакции на осях автомобиля

В результате подстановки параметров автомобиля Mercedes W211 (табл. 1) в формулы (2), (3) получены линейные зависимости вертикальных нагрузок на осях автомобиля от реализуемого продольного замедления j_3^t ($j_3^t > 0$ при торможении) с учётом продольного уклона дороги.

Передняя ось:

$$R_{z1} = 7869 + 328j_3^t + 281$$

Задняя ось:

$$R_{z2} = 8743 - 328j_3^t - 281$$

Ограничение тормозного усилия определяется фейдингом тормозов, а не сцеплением шин ($\mu < \varphi$).

Для повышения наглядности и удобства анализа допустимо предварительно ввести тормозную силу, реализуемую на i -й оси:

$$F_{z,i} = \min(\mu(T_i)R_{z,i}, \varphi R_{z,i}) \quad (4)$$

Тогда выражение для реализуемого продольного замедления принимает вид:

$$j_3^t = \frac{1}{m_a} \cdot \sum_{i=1}^2 F_{z,i} - g \cdot \sin\alpha \quad (5)$$

Реализуемые тормозные силы по осям составляют:

$$F_{\text{торм.1}} = \mu(T_1) \cdot R_{z1} = 0,3 \cdot R_{z1} = 2445 + 98,4j_3$$

$$F_{\text{торм.2}} = \mu(T_2) \cdot R_{z2} = 0,35 \cdot R_{z2} = 2962 - 114,8j_3$$

Суммарная тормозная сила равна:

$$\sum_{i=1}^2 F_{z,i} = 5407 - 16,4j_3^t$$

Подставляя полученное выражение в уравнение реализуемого продольного замедления (5), получаем:

$$j_3^t = \frac{1}{1700} \cdot (5407 - 16,4j_3^t) - 9,81 \cdot 0,0872$$

Преобразуя уравнение для последовательного решения, получаем:

$$j_3^t = 3,18 - 0,00964j_3^t - 0,85$$

Откуда реализуемое продольное замедление автомобиля составляет

$$j_3^t = 2,31 \text{ м/с}^2$$

Результаты исследования

1. Разработана обобщённая аналитическая модель реализуемого замедления, учитывающая:
 - ✓ температурный фейдинг тормозов,
 - ✓ сцепные свойства дороги,
 - ✓ перераспределение вертикальных нагрузок,
 - ✓ работу ABS и EBD.
2. Показано, что ABS/EBD обеспечивают оптимальное распределение тормозных сил, но не компенсируют снижение замедления при перегреве тормозов.
3. Численный расчёт для Mercedes W211 на уклоне 5° демонстрирует реализуемое замедление $j_3^t \approx 2,31 \text{ м/с}^2$.

Заключение

Предложенная модель позволяет количественно оценивать пределы эффективности торможения автомобилей в реальных условиях эксплуатации, включая горные спуски, с учётом теплового состояния тормозов и алгоритмов работы электронных систем безопасности. Полученные результаты могут быть использованы при анализе динамики автомобиля, разработке тормозных систем и совершенствовании алгоритмов управления ABS и EBD.

Рецензент: к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация гидромелиоративных систем» Таджикского аграрного университета имени Ш. Шохтемурра Холов Давлатали

Литература

1. Козловский В.П. *Динамика автомобиля*. — М.: Машиностроение, 2019. — 320 с. — ISBN 978-5-217-08510-1.
2. Левин А.И. *Тормозные системы современных автомобилей*. — М.: Транспорт, 2017. — 256 с. — ISBN 978-5-279-04823-9.
3. SAE International. *Tire-to-Road Friction and Vehicle Braking Dynamics*. SAE J670 202206. — SAE International, 2020. — DOI: 10.4271/J670_202206.
4. Genta G. *Motor Vehicle Dynamics: Modeling and Simulation*. — Springer, 2017. — 412 с. — ISBN 978-3-319-55631-0.
5. Bosch Automotive Handbook. 9th Edition. — Wiley, 2021. — 1632 с. — ISBN 978-1-119-03294-6.
6. Давлатшоев, Р. А. Моделирование тормозных сил и тепловых процессов при движении автомобиля на уклоне / Р. А. Давлатшоев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 2(70). – С. 104-109. – EDN YESVJT.

7. Давлатшоев, Р. А. Надёжность и работоспособность тормозной системы автомобиля при движении на уклонах / Р. А. Давлатшоев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 4(72). – С. 77-83. – DOI 10.65599/GCOK1719. – EDN DXGWFA.

8. Давлатшоев, Р. А. Анализ эффективности распределения тормозных усилий электронными системами ESP и EBD при движении автомобиля на уклоне / Р. А. Давлатшоев // Политехнический вестник. Серия: Техника и общество. – 2025. – № 3(11). – С. 4-10. – EDN SWHGCU.

9. Методика определения коэффициентов сцепления колёс с дорогой в реальных условиях эксплуатации / Р. А. Давлатшоев, Х. Б. Хусейнов, М. Ю. Юнусов [и др.] // Вестник Таджикского технического университета. – 2015. – № 3(31). – С. 115-118. – EDN VTFKNB.

10. Давлатшоев, Р. А. Сравнительный анализ эффективности торможения автомобиля в различных дорожных условиях / Р. А. Давлатшоев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2007. – № 3. – С. 46-50. – EDN TZVPJZ.

11. Пиров, Ж. Т. Влияние распределения транспортных потоков на скорость сообщения на трехполосных сегментах улично-дорожных сетей / Ж. Т. Пиров, Ш. А. Бозоров, Д. Д. Мухторов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2023. – № 1(61). – С. 148-152. – EDN DXNUVP.

12. Анализ экологической безопасности и воздействия автотранспорта на окружающую среду Республики Таджикистан / Р. А. Давлатшоев, М. К. Бутаев, Б. Ж. Маджидов, Ф. Джобиров // Политехнический вестник. Серия: Техника и общество. – 2025. – № 4(12). – С. 21-25. – DOI 10.65599/TUYY7674. – EDN YBVSBA.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

TJ	RU	EN
Давлатшоев Рашид Асанхонович	Давлатшоев Рашид Асанхонович	Davlatshoev Rashid Asankhonovich
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С. Осими	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after ac. M.S. Osimi
н.и.т, дотсент	к.т.н, доцент	Candidate of Technical Sciences
E-mail: d_rashid71@mail.ru		
ORCID Id 0000-0002-7317-5245		
TJ	RU	EN
Мажитов Б.Ж.	Мажитов Б.Ж.	Mazhitov B.Zh.
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С. Осими	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after ac. M.S. Osimi
н.и.т, дотсент	к.т.н, доцент	Candidate of Technical Sciences
E-mail: mjbahridin@mail.r		