

АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ РЕАЛІЗОВАНОГО ЗЧЕПЛЕННЯ МІЖ ШИНОЮ АВТОМОБІЛЬНОГО КОЛЕСА ТА ПОВЕРХНЕЮ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ

Леонт'єв Дмитро Миколайович, д.т.н., професор, професор кафедри автомобілів ім. А.Б. Гредескула, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, a3alij@i.ua ORCID: 0000-0003-4255-6317

Ярита Олександр Олександрович, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, aleks.yarita@gmail.com

Володін Валерій Владиславович, здобувач каф. автомобілів, val.volod1@gmail.com ORCID: 0009-0004-0107-5618

Сметанін Герман Володимирович, здобувач PhD кафедри автомобілів ім. А.Б.Гредескула, Харківський національний автомобільно-дорожній університет smetanin.gv@gmail.com,

Головань Олександр Олегович, студентів групи АА-61-24 Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Актуальність проблеми. Забезпечення безпеки дорожнього руху неможливе без точного прогнозування поведінки транспортного засобу в різних умовах експлуатації. Ключовим аспектом є визначення реалізованого зчеплення (коефіцієнта тертя) у контактній плямі шини з дорожнім покриттям. Цей параметр має вирішальне значення для ефективності сучасних систем активної безпеки, таких як антиблокувальна система (ABS), система електронної стабілізації (ESP) та система розподілу гальмового зусилля, а також для розробки високоточних симуляторів руху та проектування самих шин.

Мета дослідження. Провести аналіз існуючих математичних моделей розрахунку реалізованого зчеплення, визначити їх точність та придатність для різних режимів руху колеса (гальмування, розгону), ідентифікувати універсальні методи, здатні з високою точністю описувати повну « $f-S$ діаграму» в діапазоні ковзання (S) від -1 до +1.

Основні методи дослідження. У роботі виконано поглиблений аналіз науково-технічної літератури та математичних моделей, серед яких: модель *Racejka* («Магічна формула»); експоненційна модель *Burckhardt*; моделі *Denny*, *Kiencke* та *Daiss*; моделі на основі парабол та кубічних залежностей; моделі, що базуються на жорсткісних характеристиках шини; нормалізовані ступеневі та експоненційні функції.

Проведено чисельне моделювання з фіксованими значеннями ключових точок « $f-S$ діаграми» (коефіцієнт опору коченню f_0 , максимальне зчеплення f_m , зчеплення при блокуванні f_b , критичне ковзання S_k) та порівняльну оцінку точності отриманих результатів.

Ключові результати дослідження та висновки полягають у наступному:

1. Не всі моделі є універсальними. Більшість проаналізованих рівнянь призначені лише для режиму гальмування колеса та не здатні адекватно

описувати процес розгону (буксування). Винятком є модель *Racejka*, яка охоплює весь діапазон ковзань.

2. Групування моделей за точністю та придатністю: Високоточні моделі визначення реалізованого зчеплення для режиму гальмування автомобільного колеса демонструють добру збіжність із заданими ключовими точками « f - S діаграми». Моделі зі значними похибками мають суттєві відхилення на окремих ділянках кривої, що робить їх мало придатними для моделювання роботи прецизійних систем активної безпеки. Універсальні моделі, а також запропоновані у роботі нормалізовані та експоненційні моделі здатні з високою точністю описувати реалізоване зчеплення, як у гальмовому, так і в тяговому режимі кочення автомобільного колеса. Особливо варто відзначити запропоноване рівняння (1), яке завдяки своїй простоті та відсутності втрати точності є зручним для практичного використання.

$$f_x = \left((\text{sign}(S) \cdot f_{mi} + f_0) \cdot \left(1 - \exp\left(-k_1 \cdot \frac{|S|}{S_{ki}}\right) \right) - f_0 \right) \left(1 - \frac{(f_{mi} - f_{bi}) \cdot (|S| - S_{ki})}{f_{mi} \cdot (1 - S_{ki})} \right), \quad S \in [-1, 0] \cup [0, 1]. \quad (17)$$

В рівнянні використані ключові точки « f - S діаграми»: $[0, -f_0]$, $[\mp S_{ki}, \mp f_{mi}]$, $[\mp 1, \mp f_{bi}]$ та константа $k_1 \geq 5$ (ціле),

3. Проблема параметризації. Багато методів вимагають точного визначення коефіцієнтів, які є несталими величинами та залежать від швидкості руху, тиску в шині, температури, стану дорожнього покриття тощо. Похибка у визначенні цих параметрів може призводити до значних розбіжностей між моделлю та реальністю.

4. Перспективність жорсткісних моделей. Моделі, що базуються на кутах закручування шини та її крутильній жорсткості, показали хороші результати, але потребують подальшого вдосконалення в частині точності визначення пружних параметрів.

Практична цінність результатів дослідження. Отримані результати дозволяють обґрунтовано підійти до вибору математичної моделі для конкретних прикладних задач:

– для моделювання повної « f - S діаграми» (наприклад, у повномасштабних симуляторах) рекомендовано використовувати універсальні рівняння;

– для задач, пов'язаних виключно з гальмуванням (розробка ABS), можуть бути ефективно застосовані більш прості та точні моделі;

Результати дослідження можуть бути використані при створенні нових шин, оптимізації алгоритмів систем активної безпеки та проведенні віртуальних випробувань динаміки транспортних засобів.

Висновки

Систематизований аналіз методів розрахунку реалізованого зчеплення дозволив виявити їх сильні та слабкі сторони, сформулювати критерії вибору залежно від поставленої задачі та ідентифікувати найбільш ефективні та

універсальні математичні моделі для подальшого використання в наукових дослідженнях та інженерній практиці. Подальші дослідження планується спрямувати на дослідженні впливу змінних експлуатаційних факторів, таких як швидкість, температура та стан дорожнього покриття, на параметри ключових точок «*f-S* діаграми».

Література

1. Feng, S., Zhao, Y., Deng, H. *et al.* (2021). Parameter Identification of Magic Formula Tire Model Based on Fibonacci Tree Optimization Algorithm. *J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.)* **26**, 647–657. <https://doi.org/10.1007/s12204-021-2354-9>
2. Burckhardt M. Erfahrungen bei der Konzeption und Entwicklung des Mercedes-Benz (1979). Bosch – Anti-Blockier-Systems (ABS). *Automobiltechnische Zeitschrift*, **81(5)**, 201–208.
3. Mark Denny (2005). The dynamics of antilock brake systems. *European Journal of Physics*. **26(6)**, 1007 - 1016.
4. Kiencke, U. and Daiss, A. (1994). Estimation of Tyre Friction for Enhanced ABS Systems. *In: Proceedings of the AVEG'94*, 515-520.
5. Canudas-de-Wit, Carlos & Tsiotras, Panagiotis & Velenis, Efstathios & Basset, Michel & Gissinger, G.I. (2003). Dynamic Friction Models for Road/Tire Longitudinal Interaction. *Vehicle System Dynamics*. **39(3)**. 189-226. <https://doi.org/10.1076/vesd.39.3.189.14152>
6. Michelin Technology Society (1999) *The tyre. Grip*. France
7. Michelin Technology Society (2001) *The tyre. Grip*. France
8. Han, K.; Hwang, Y.; Lee, E.; Choi, S. (2016). Robust Estimation of Maximum Tire-road friction Coefficient Considering Road Surface Irregularity. *Int. J. Automot. Technol.* **17**, 415–425. <https://doi.org/10.1007/s12239-016-0043-8>
9. Леонтьєв, Д. М. (2011). Системний підхід до створення автоматизованого гальмівного керування транспортних засобів категорій M_3 та N_3 . ХНАДУ. Leontiev, D. M. (2011). Systemnyi pidkhid do stvorennia avtomatyzovanoho halmivnoho keruvannia transportnykh zasobiv katehorii M_3 ta N_3 [A systematic approach to the creation of an automated brake control for vehicles of categories M_3 and N_3]. Kharkiv National Automobile and Highway University.
10. Rill, G. (2009). *Vehicle Dynamics. Lecture notes*. Hochschule Regensburg University of Applied Sciences.
11. Dugoff, H., Fancher, P. S., and Segel, L. (1969). *Tire performance Characteristics Affecting Vehicle Response to Steering and Braking Control Inputs*, Final Report for Contract No, CST-460, Office of Vehicle Systems Research, National Bureau of Standards, Washington.
12. Фролов, А. А. (2023). Удосконалення методу визначення реалізованого зчеплення шин здвоєних коліс транспортного засобу в режимі гальмування. Харківський національний авто-мобільно-дорожній університет. Frolov, A. A. (2023). Udoskonalennia metodu vyznachennia realizovanoho zcheplennia shyn zdvoienykh kolis transportnoho zasobu v rezhymi halmuvannia. [Improvement of

the method of determining the adhesion utilized of tires at dual wheels vehicle with the surface of the road pavement] Kharkiv National Automobile and Highway University.

13. Леонтьев, Д. М. (2021). *Теоретичні основи гальмування багатовісних транспортних засобів з електронневатичною гальмовою системою*. Харківський національний автомобільно-дорожній університет. Leontiev D.M. (2021) *Teoretychni osnovy halmuvannia bahatovisnykh transportnykh zasobiv z elektropnevmatychnoiu halmovoiu systemoiu [Theoretical bases of braking of multi-axle vehicles with electropneumatic brake system]* Kharkiv National Automobile and Highway University.
14. Klimenko, V., Kapski, D., Leontiev, D., Kuripka, O., & Frolov, A. (2021). Determination of tangential properties of a single pneumatic tire in the vehicle braking mode of a vehicle. *Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*, (19), 28–34. <https://veit.khadi.kharkov.ua/article/view/226798>
15. Leontiev, D., & Don, E. (2016). Specifics of automobile dual wheels interaction with the supporting surface. *Automobile Transport*, (39), 74. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2016.39.0.74>
16. Leontiev, D. N., Mikhalevich, N. G., & Frolov, A. A. (2018). Influence of vertical load on braking force and tyre adhesion coefficient of vehicle wheel. *Theory and Practice of Forensic Science and Criminalistics*, 18, 383-392. <https://doi.org/10.32353/khrife.2018.42>
17. Leontiev, D., Klymenko, V., Aloksa, M., & Sylchenko, M. (2022). Regarding the issue of determining the deceleration of a two-axle vehicle with a damaged brake system. *Automobile Transport*, (50), 21–28. <https://doi.org/10.30977/AT.2019-8342.2022.50.0.03>
18. Shuklinov, S.M., Klymenko, V.I., Leontiev, D.M., Aloksa M. M. (2023). *Automobile. Theory and operational properties : study guide*. Kharkiv National Automobile and Highway University. ISBN 978-617-8238-19-3
19. Maknickas, A., Ardatov, O., Bogdevičius, M., & Kačianauskas, R. (2022). Modelling the Interaction between a Laterally Deflected Car Tyre and a Road Surface. *Applied Sciences*, 12(22), 11332. <https://doi.org/10.3390/app122211332>
20. Fathi, H., Khosravi, M., El-Sayegh, Z., & El-Gindy, M. (2023). An Advancement in Truck-Tire–Road Interaction Using the Finite Element Analysis. *Mathematics*, 11(11), 2462. <https://doi.org/10.3390/math11112462>
21. Millan, P., Ambrósio, J. (2025). Tire–road contact modelling for multibody simulations with regularised road and enhanced UA tire models. *Multibody Syst Dyn* 63, 273–302 <https://doi.org/10.1007/s11044-024-09987-z>
22. Mantaras, D.A., Luque, P. & Alonso, M. (2022). Phase plane analysis applied to non-explicit multibody vehicle models. *Multibody Syst Dyn* 56, 173–188 <https://doi.org/10.1007/s11044-022-09846-9>
23. Guastadisegni, G., De Pinto, S., Cancelli, D., Labianca, S., Gonzalez, A., Gruber, P., & Sorniotti, A. (2023). Ride analysis tools for passenger cars: objective and subjective evaluation techniques and correlation processes – a review. *Vehicle System Dynamics*, 62(7), 1876–1902. <https://doi.org/10.1080/00423114.2023.2259024>