

УДК 629.01

[https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-10\(51\)-1360-1368](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-10(51)-1360-1368)

Второв Руслан Юрійович магістрант кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, <https://orcid.org/0009-0006-3473-6931>

Кубіч Вадим Іванович кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, <https://orcid.org/0000-0001-6230-9263>

ВПЛИВ РОЗПОДІЛУ ГАЛЬМІВНИХ СИЛ ТА ЗЧЕПЛЕННЯ ШИН НА ЗМІНУ ГАЛЬМІВНОГО ШЛЯХУ АВТОМОБІЛЯ КАТЕГОРІЇ М1

Анотація. Безаварійна технічна експлуатація автомобілів визначається комплексом факторів впливу, до яких відносяться у тому числі конструктивна безпека, дорожні умови, режим руху автомобіля тощо.

Виключно справний стан гальмівної системи, наприклад, автомобіля категорії М1, за конструкторсько-технологічною документацією та вимогами щодо безпечності технічного стану зумовлює його відповідний гальмівний шлях. На зміну гальмівного шляху автомобіля безумовно впливають як характер розподілу гальмівних сил по гальмівним механізмам, який повинен бути пропорційним перерозподілу ваги по вісям при гальмуванні, так і за умови зчеплення протектору шин з опорною поверхнею, які змінні на дорогах із різними покриттями. Негативним впливом є досягнення режиму блокування гальмівних механізмів за неправильним розподіленням гальмівних сил, що призводить до небажаного переходу від режиму кочення колеса до його повної зупинки, до кочення з проковзуванням, проковзування, що значно збільшує як гальмівний шлях, так і може викликати порушення курсової стійкості руху.

Сучасний автомобіль для запобігання зазначеного має відповідне обладнання, починаючи із регуляторів гальмівних сил і закінчуючи електронними системами менеджменту безпечним рухом автомобіля, це, наприклад, системи ABS, ESP, ESC, VSC, DSC. Змоделювати гальмівний шлях сучасного автомобіля у змінних дорожніх умовах досить складно у зв'язку із багатофакторністю впливів та параметрів їх оцінки, що є актуальним завданням при здійсненні автотехнічної експертизи дорожньо-транспортних пригод, і цьому питанню присвячено досить широкий діапазон нормативних актів та наукових публікацій. Об'єктивність і повнота врахування факторів впливу на гальмівний

шлях автомобіля за різним темпом його гальмування при перерозподілі ваги по вісям автомобіля при змінних коефіцієнтах зчеплення шин з опорною поверхнею у конкретних дорожніх умовах на даний час представляють відкрите питання.

У роботі у розрахунковий спосіб розглянуто процес розподілу гальмівних сил між передньою та задньою віссю автомобіля категорії М1 із відповідним конструктивним розподілом ваги під час гальмування. При цьому проведені аналітичні дослідження впливу коефіцієнта розподілу гальмівних сил на гальмівний шлях та прогнозовану повздовжню стійкість руху автомобіля категорії М1 з урахуванням зміни коефіцієнта зчеплення шин з дорогою.

Визначено, що оптимальний коефіцієнт розподілу гальмівних сил для автомобіля Daewoo Lanos складає $\beta=0,33$, що забезпечує мінімальний гальмівний шлях і максимальну стабільність руху при гальмуванні з врахуванням дії системи ABS. Побудовано графічні залежності між гальмівним шляхом, коефіцієнтом зчеплення та розподілом гальмівних зусиль, що дозволяє оцінити характер впливу цих параметрів за отриманими закономірностями. Вважається можливим застосування отриманих результатів при проектуванні та удосконаленні гальмівних систем сучасних легкових автомобілів для підвищення їх безпеки руху.

Ключові слова: гальмівна система, коефіцієнт зчеплення, гальмівний шлях, розподіл гальмівних сил, безпека руху.

Vtorov Ruslan Yuriyovych Master's student at the Department of Automobiles, Heat Engines and Hybrid Power Plants, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, <https://orcid.org/0009-0006-3473-6931>

Kubich Vadym Ivanovych Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automobiles, Heat Engines and Hybrid Power Plants, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, <https://orcid.org/0000-0001-6230-9263>

INFLUENCE OF BRAKING FORCE DISTRIBUTION AND TIRE GRIP ON THE CHANGE IN BRAKING DISTANCE OF A CATEGORY M1 VEHICLE

Abstract. Accident-free technical operation of vehicles is determined by a complex of influencing factors, which include constructive safety, road conditions, vehicle movement mode, among others. The exclusively serviceable condition of the braking system, for example of a category M1 vehicle, according to design and technological documentation and technical condition safety requirements, determines its corresponding braking distance. The change in a vehicle's braking distance is

undoubtedly influenced by both the nature of braking force distribution among braking mechanisms, which should be proportional to weight redistribution between axles during braking, and tire tread adhesion conditions with the supporting surface, which vary on roads with different surfaces. A negative effect is achieving the braking mechanism locking mode due to incorrect distribution of braking forces, which leads to an undesirable transition from the wheel rolling mode to its complete stop to rolling with slippage, significantly increasing both the braking distance and potentially causing loss of directional stability. Modern vehicles have appropriate equipment to prevent this, starting with braking force regulators and ending with electronic safety management systems such as ABS, ESP, ESC, VSC, DSC. Modeling the braking distance of a modern vehicle in variable road conditions is quite complex due to the multifactorial influences and parameters for their assessment, which is a relevant task in conducting automotive technical examination of road traffic accidents, and this issue is covered by a fairly wide range of regulatory acts and scientific publications. The objectivity and completeness of accounting for factors influencing a vehicle's braking distance at different braking rates with weight redistribution between vehicle axles under variable tire-road surface adhesion coefficients in specific road conditions currently remain an open question.

The work examines in a computational manner the process of braking force distribution between the front and rear axles of a category M1 vehicle with corresponding constructive weight distribution during braking. Analytical studies were conducted on the influence of the braking force distribution coefficient on braking distance and predicted longitudinal motion stability of a category M1 vehicle, taking into account changes in the tire-road adhesion coefficient. It was determined that the optimal braking force distribution coefficient for the Daewoo Lanos vehicle is $\beta=0.33$, which ensures minimum braking distance and maximum motion stability during braking, considering the action of the ABS system. Graphical dependencies were constructed between braking distance, adhesion coefficient, and braking force distribution, allowing evaluation of the nature of these parameters' influence according to the obtained patterns. The obtained results are considered applicable in designing and improving braking systems of modern passenger cars to enhance their traffic safety.

Keywords: braking system, adhesion coefficient, braking distance, braking force distribution, traffic safety.

Постановка проблеми. Ефективність гальмування автомобіля визначається правильним розподілом гальмівних сил між осями, який має відповідати динамічному перерозподілу навантаження під час уповільнення. Порушення цього співвідношення призводить до блокування коліс, втрати курсової стійкості та збільшення гальмівного шляху.

На результати гальмування істотно впливають умови зчеплення шин з дорогою, що залежать від типу та стану покриття. Незважаючи на наявність систем ABS та інших електронних засобів керування гальмуванням, питання оптимізації розподілу гальмівних сил між осями автомобіля категорії М1 з урахуванням зміни коефіцієнта зчеплення залишається актуальним і потребує подальшого дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи гальмування автомобілів є критично важливими для забезпечення безпеки дорожнього руху. Їхня ефективність залежить як від конструктивних рішень, що закладаються під час проектування, так і від факторів, пов'язаних з експлуатацією. Так розглядаються питання, які пов'язані із виявленням причини зниження ефективності гальмівних систем, із оцінкою впливу змінних коефіцієнтів чутливості та пробної дії на ефективність гальмування, керованість та стійкість автомобіля, із оцінкою впливу антиблокувальної системи на ефективність гальмування легкового автомобіля, із аналізу розподілу гальмівних сил між вісями автомобіля категорії М1 [1-3,5 та інші].

Також здійснюється поглиблений аналіз щодо конструктивного виконання дискових гальмівних механізмів та факторів, що впливають на ефективність їх використання, наприклад, робота [4], та інші.

Розглядаються питання впровадження шляхів поліпшення динаміки гальмування автомобіля.

При цьому отримано залежності, що дозволяють визначити оптимальне співвідношення гальмівних сил на двоосному автомобілі, виходячи з умови одночасного блокування всіх коліс.

При розгляді питань підвищення стійкості, керованості і функціональної стабільності легкових автомобілів при службових гальмуваннях на думку авторів у роботі [6,7] визначено ідеальний закон розподілу гальмівних сил між осями.

Але об'єктивність і повнота врахування факторів впливу на гальмівний шлях автомобіля за різним темпом його гальмування при перерозподілі ваги по вісям автомобіля при змінних коефіцієнтах зчеплення шин з опорною поверхнею у конкретних дорожніх умовах на даний час представляють відкрите питання.

Мета статті – визначення впливу розподілу гальмівних сил між передньою та задньою осями неповнопривідного автомобіля категорії М1 на його гальмівний шлях при гальмуванні у різноманітних дорожніх умовах.

Виклад основного матеріалу. Для проведення аналітичних досліджень у якості автомобіля, який відноситься до категорії М1 обрано неповнопривідний Daewoo Lanos, оснащений допоміжною системою гальмування ABS. У відповідності із класичною методикою розрахунку гальмівних механізмів [8]

для зазначеного автомобіля виконані розрахунки, у відповідності із якими визначено коефіцієнт розподілу гальмівних сил β між осями у статичних умовах (відсутній перерозподіл ваги між вісями при гальмуванні).

З урахуванням ваги автомобіля $m_s=10684$ Н, коефіцієнта зчеплення з дорогою $\varphi=0,85$, нормальних реакціях $R_{z1}=7154$ Н і $R_{z2}=3529$ Н, а також умов, що для легкових автомобілів подібного класу зазвичай в статичних умовах навантаження на передню вісь складає приблизно 60%, на задню – 40%, коефіцієнт розподілу $\beta=0,33$. Такий розподіл є оптимальним з точки зору навантаження осей, динаміки, геометрії кузова і забезпечення стійкості для заданого автомобіля-прототипу.

Розрахунок гальмівного шляху при різних коефіцієнтах зчеплення та розподілу гальмівних сил проведено за таких умов:

- початкова швидкість гальмування становить $100 \text{ км/год} \approx 27,78 \text{ м/с}$;
- система ABS активна та справно функціонує;
- коефіцієнти зчеплення з дорогою складають: для ожеледиці, $\varphi_1 = 0,15$; засніженої дороги $\varphi_2 = 0,3$; вологого асфальту $\varphi_3 = 0,6$; сухого асфальту $\varphi_4 = 0,85$;
- значення коефіцієнту розподілу модельоване і складає: при надмірному навантаженні на передній осі $\beta = 0,2$; наближене до оптимального $\beta = 0,25$; оптимальний розподіл $\beta = 0,33$; надмірне навантаження на задній осі $\beta = 0,4$; значне перевантаження задньої осі, $\beta = 0,5$.

Гальмівний шлях визначався за виразом [9]:

$$S_n = \frac{v^2}{2 \cdot \varphi_n \cdot g \cdot \eta_n} \quad (1)$$

де v – початкова швидкість гальмування, м/с;

φ_n – коефіцієнт зчеплення;

η_n – коефіц. ефективного використання зчеплення, якій залежить від β .

У даній роботі моделюються умови гальмування автомобіля, які наближені до ідеальних. Антиблокувальна система (ABS) не забезпечує автоматичного скорочення гальмівного шляху, а призначена для збереження стійкості автомобіля під час екстреного гальмування.

В умовах правильно налаштованого розподілу β , ABS дозволяє уникнути блокування коліс і реалізувати потенціал зчеплення максимально ефективно. У розрахунках вплив ABS враховано через використання коефіцієнта η , який відображає рівень ефективності гальмування без блокування коліс.

Коефіцієнт η враховує, наскільки ефективно використовується потенціал зчеплення при заданому розподілі гальмівних зусиль. При ідеальному розподілі

(коли всі колеса гальмують рівномірно без блокування) $\eta = 1$. Для автомобіля-прототипу оптимальний розподіл гальмівних сил між осями $\beta = 0,33$.

Тому використовуючи інформацію з літературних джерел [1,6,7 та інші], приймаємо такі значення η : при $\beta = 0,2$, $\eta_1 = 0,8$; при $\beta = 0,25$, $\eta_2 = 0,85$; при $\beta = 0,33$, $\eta_3 = 0,95$; при $\beta = 0,4$, $\eta_4 = 0,9$; при $\beta = 0,5$, $\eta_5 = 0,85$.

За результатами розрахунків гальмівного шляху за виразом (1) побудовані графічні залежності, які наведено на рисунках 1, 2.

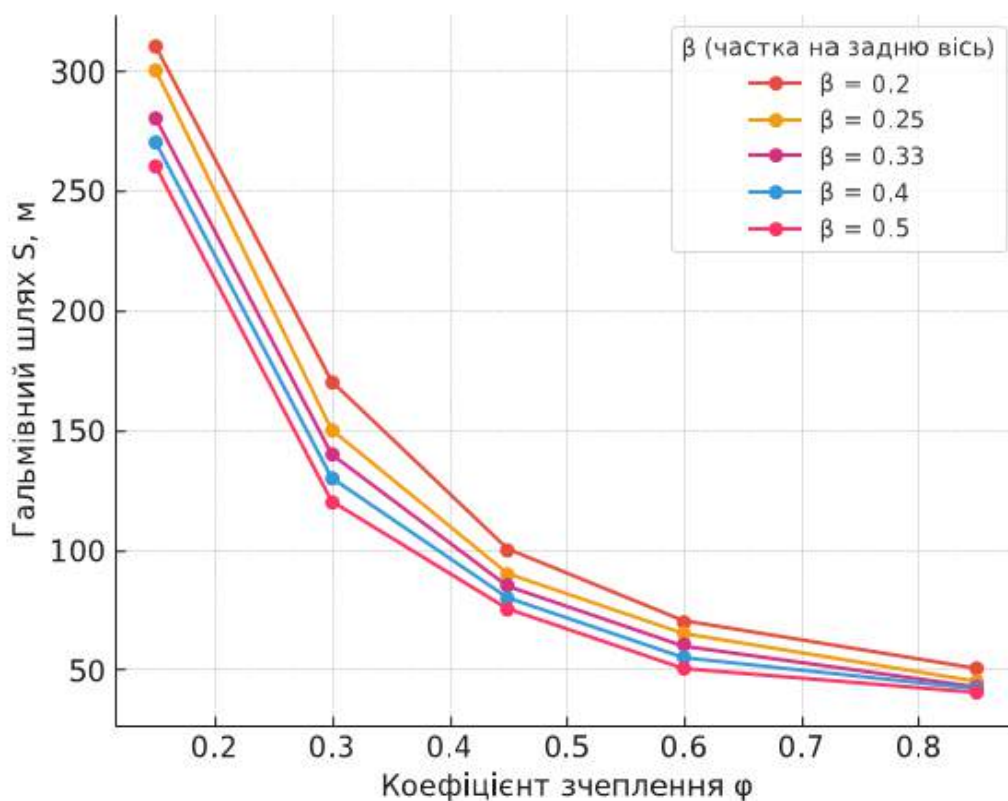


Рис. 1. Закономірності зміни гальмівного шляху автомобіля Daewoo Lanos при моделюванні умов зчеплення шин з дорогою та змінах коефіцієнта перерозподілу гальмівних сил між його осями

Аналіз отриманих графічних залежностей вказує на наступне.

Найменший гальмівний шлях у кожному випадку спостерігається при $\beta = 0,33$. Це у свою чергу підтверджує, що оптимальний розподіл гальмівних зусиль між осями автомобіля-прототипу складає 67/33%.

Відхилення від цього розподілу – як у бік надмірного навантаження передньої осі ($\beta = 0,2$), так і задньої ($\beta = 0,5$) – призводить до зниження ефективності гальмування.

Отримані результати доводять важливість коректного конструктивного розподілу гальмівних зусиль на стадії проектування системи.

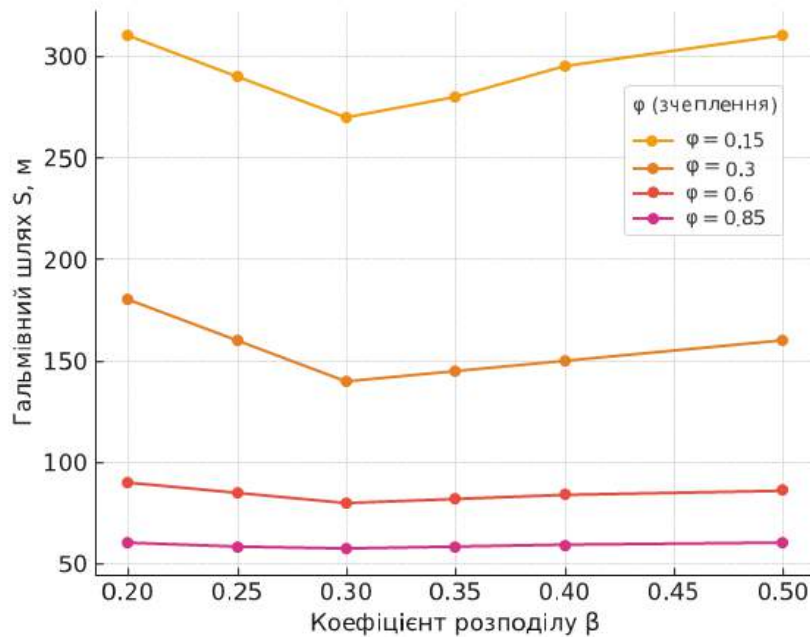


Рис. 2. Вплив коефіцієнта розподілу гальмівних сил між осями автомобіля Daewoo Lanos на його гальмівний шлях

Зі зростанням ϕ (від 0,15 до 0,85) гальмівний шлях монотонно зменшується для всіх значень β . Крива має гіперболічний характер – початкове зростання ϕ (наприклад, з 0,15 до 0,3) дає найбільше скорочення гальмівного шляху – при $\beta = 0,33$ гальмівний шлях зменшується з 276 м до 138 м – зменшення складає 50%. Далі інтенсивність зменшення слабшає – між $\phi = 0,6$ та $\phi = 0,85$ скорочення менш суттєве – приблизно 30%. Відхилення від оптимального розподілу в будь-який бік ($\beta < 0,25$ або $> 0,4$) збільшує гальмівний шлях – особливо при низькому ϕ . Це підтверджує важливість правильного розподілу гальмівних зусиль між осями автомобіля.

Для кожного значення ϕ залежність (рис.2) має виражений мінімум при $\beta = 0,33$. Графіки мають параболічну форму – симетричне зростання гальмівного шляху при відхиленні β в обидва боки. При $\phi = 0,6$ зміна не дуже різка, а при $\phi = 0,15$ – зміна дуже інтенсивна – гальмівний шлях змінюється від 276 м ($\beta = 0,33$) до 327,8 м ($\beta = 0,2$) → збільшення складає 19%. Критичність правильного розподілу гальмівних сил суттєво виражена при низьких значеннях ϕ (слизька дорога) – відхилення від оптимального β дає сильні негативні наслідки.

Висновки. Встановлено, що оптимальний розподіл гальмівних зусиль між передньою та задньою осями (67/33%) суттєво впливає на величину гальмівного шляху автомобіля при гальмуванні. При зміні цього параметра в більшу чи меншу сторону, спостерігається значна втрата ефективності гальмування. Це доводить критичну важливість правильного розподілу гальмівних сил між осями автомобіля.

Найкращий результат величини гальмівного шляху досягнуто при $\beta = 0,33$ на сухому асфальті – $\varphi = 0,85$: $S = 48,7$ м. Найгірший результат отримано при $\beta = 0,2$ на ожеледиці – $\varphi = 0,15$: $S = 327,8$ м.

Неправильний розподіл гальмівних зусиль призводить до значного зниження ефективності гальмування автомобіля, що у свою чергу при екстремому гальмуванні може значно вплинути на кінцевий результат.

Отримані результати дослідження підкреслюють значущість правильного розподілу гальмівних зусиль між осями автомобіля та можуть бути використані для проведення наступних досліджень цього питання. Прикладом наступних досліджень може бути оцінка впливу коефіцієнту розподілу гальмівних сил на стійкість автомобіля під час екстремого гальмування у відсутності антиблокувальної системи.

Література:

1. Страшний І. Л., Маренко Г. М. Перевірка гальмівних властивостей вантажного автомобіля військового призначення на відповідність нормативним вимогам // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. 2023. № 2 (42). С.101–106. DOI: 10.33405/2409-7470/2023/2/42/293389
2. Гецович Є. М., Бондаренко А. І., Шелудченко В. В. Вплив змінних коефіцієнтів чутливості та пробної дії на ефективність гальмування, керованість та стійкість // Східно-європейський журнал передових технологій. 2009. № 1/5 (37). С. 4–6.
3. Кліменко В. І., Сараєв О. В., Давіденко А. І. Дослідження впливу антиблокувальної системи на ефективність гальмування легкового автомобіля // Автомобільний транспорт. 2011. № 29. С. 245–249.
4. Загурський А. О. Фактори впливу на ефективність використання дискових гальмівних систем колісних транспортних засобів // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. 2024. № 24. С. 108–118. DOI: 10.37700/ts.2024.24.108-118
5. Хорольський А. В. Підвищення керованості і функціональної стабільності легкових автомобілів: кваліфікаційна робота магістра: спец. 274 – Автомобільний транспорт. Харків, 2020. 59 с.
6. Туренко О. І. Підвищення стійкості, керованості і функціональної стабільності легкових автомобілів при службових гальмуваннях: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук (д-ра філософії) : за спец. 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту. Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2018. 173 с.
7. Кравчук П. М. Розрахункове визначення гальмівної ефективності колісних транспортних засобів під час сертифікації: дис. на здобуття наукового ступеня к.т.н., спеціальність 05.22.02 – автомобілі та трактори. Київ : НТУ. 2015. 185 с.
8. Вікович І. А. Теорія руху транспортних засобів. Підручник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. 672 с.
9. Методичні вказівки з вивчення дисципліни «Випробування, діагностика, діагностичне обладнання» та виконання контрольних завдань, для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» («Колісні та гусеничні транспортні засоби»), усіх форм навчання. / Укл. : А. В. Щербина, О. М. Артюх, О. В. Дударенко, А. Ю. Сосик. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2019. – 34 с.

References:

1. Strashny, I. L., Marenko, G. M. (2023). Perevirka galmivnih vlastivostej vantazhnogo avtomobilya vijskovogo pryznachennya na vidpovidnist normativnim vimogam [Checking the braking properties of a military truck for compliance with regulatory requirements] // *The collection of scientific works of the National Academy of the National Guard of Ukraine*, 2 (42), 101–106. DOI: 10.33405/2409-7470/2023/2/42/293389 [in Ukrainian].
2. Getsovykh, E. M., Bondarenko, A. I., Sheludchenko, V. V. (2009). Vplyv zminnih koefitsiyentiv chutlivosti ta probnoyi diyi na efektyvnist galmuvannya, kerovanist ta stijkist [The influence of variable sensitivity coefficients and trial action on braking efficiency, controllability and stability] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. № 1/5 (37). P. 4–6. [in Ukrainian].
3. Klimenko, V. I., Sarayev, O. V., Davydenko, A. I. (2011). Doslidzhennya vplyvu antiblokuvalnoyi sistemi na efektyvnist galmuvannya legkovogo avtomobilya [Research on the influence of an anti-lock system on the braking efficiency of a passenger car] // *Automotive Transport*, 29, 245–249.
4. Zagursky, A. O. (2024). Faktori vplyvu na efektyvnist vikorystannya diskovyh galmivnih sistem kolisnih transportnih zasobiv [Factors influencing the efficiency of using disc brake systems of wheeled vehicles] // *Technical service of agro-industrial, forestry and transport complex*, 24, 108–118. DOI: 10.37700/ts.2024.24.108-118 [in Ukrainian].
5. Khorolsky, A. V. (2020). *Pidvishennya kerovanosti i funktsionalnoyi stabilnosti legkovih avtomobiliv: kvalifikacijna robota magistra: spec. 274 – Avtomobilnij transport [Increasing the controllability and functional stability of passenger cars : Master's qualification work, specialty 274 – Motor transport]*. Kharkiv, 59. [in Ukrainian].
6. Turenko, O. I. (2018). *Pidvishennya stijkosti, kerovanosti i funktsionalnoyi stabilnosti legkovih avtomobiliv pri sluzhbovoh galmuvannyah: dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tehn. nauk (d-ra filosofiyi) : za spec. 05.22.20 – Ekspluatatsiya ta remont zasobiv transportu [Increasing the stability, controllability and functional stability of passenger cars during service braking: dissertation for the degree of candidate of technical sciences (doctor of philosophy): for spec. 05.22.20 – Operation and repair of vehicles]*. Kharkiv : Kharkiv National Automobile and Road University, 173. [in Ukrainian].
7. Kravchuk, P. M. (2015). *Rozrahunkove viznachennya galmivnoyi efektyvnosti kolisnih transportnih zasobiv pid chas sertifikatsiyi: dis. na zdobuttya naukovogo stupenya k.t.n., specialnist 05.22.02 – avtomobili ta traktori [Calculated determination of braking efficiency of wheeled vehicles during certification: dissertation for the degree of Ph.D., specialty 05.22.02 – Cars and tractors]*. Kyiv : NTU, 185. [in Ukrainian].
8. Vikovych, I. A. (2013). *Teoriya ruhu transportnih zasobiv [Theory of vehicle movement]*. Lviv : Lviv Polytechnic Publishing House, 672. [in Ukrainian].
9. Shcherbyna, A. V., Artyukh, O. M., Dudarenko, O. V., Sosyk, A. Yu. (2019). *Metodichni vkazivki z vivchennya disciplini «Viprobuвання, diagnostyka, diagnostichne obladnannya» ta vikonannya kontrolnih zavdan, dlya studentiv specialnosti 133 «Galuzeve mashinobuduvannya» («Kolisni ta gusenichni transportni zasobi»), usih form navchannya [Methodological instructions for studying the discipline "Testing, diagnostics, diagnostic equipment" and performing control tasks, for students of specialty 133 "Industrial mechanical engineering" ("Wheeled and tracked vehicles"), all forms of study]*. Zaporizhzhia : National University "Zaporizhzhia Polytechnic", 34. [in Ukrainian].