

Петров Л.М.

Військова академія, Одеса

Петрик Ю.М.

Військова академія, Одеса

Борисенко Т.М.

ТОВ «Агентство продажу активів»

ТЕОРІЯ Л.М. ПЕТРОВА З ДОДАТКАМИ ПЕТРИКА ТА БОРИСЕНКА ПРИ ВИКОРИСТАННІ ТЕОРЕМИ ЕЙЛЕРА-ШАЛЯ ДЛЯ КОЛІСНОГО РУШІЯ АВТОМОБІЛЯ

В статті авторів Л.М. Петрова, Ю.М. Петрика, Т.М. Борисенка представлена теоретична розробка вдосконалення технології розгортання плями контакту шини колісного рушія автомобіля та розрахунку процесу такого розгортання шляхом урахування процесу руху точки прикладання сили ваги до плями контакту. Проведений аналіз поточних досліджень в приведеному науковому напрямку, а також аналіз сучасних наукових та технічних рішень для умов переміщення автомобіля з застосуванням колісних рушіїв, а також вплив динаміки розгортання плями контакту колісного рушія на робочі параметри руху автомобіля.

Окрему увагу приділено оптимізації параметру довжини плями контакту шини колісного рушія з опорною поверхнею для досягнення найбільшої ефективності на різних типах дорожнього покриття, а також в умовах бездоріжжя, що найбільш притаманно вантажної автомобільної техніці. Виконано теоретичний аналіз тиску на поверхню в залежності від розміру шини колеса, а також проведено оцінювання зміни коефіцієнта зчеплення у різних дорожніх умовах та вплив його на довжину плями контакту. Розглянуто вплив параметрів руху колісного рушія на динамічну поведінку автомобіля: збільшення чи зменшення радіуса кривизни розгортання плями контакту.

Приведено фізико-математичну модель розгортання плями контакту відносно опорної поверхні технічні рішення для автоматичного налаштування плями контакту шини колісного рушія, які дають змогу підлаштовуватись до різних дорожніх умов без потреби зупинки автомобіля. У статті також звертається увага на технічний бік впровадження технології оцінки руху плями контакту в залежності від паспортних даних виготовлення шини.

Проведений порівняльний огляд існуючих теоретичних досліджень динаміки руху плями контакту та запропонованої теорії динамічному розгортанні плями контакту шини колісного рушія вантажного автомобіля. Приведені результати розрахунку основного параметра розгортання плями контакту, які показують ефективність використання даної теорії для поліпшення роботи і експлуатації вантажного транспортного засобу.

Проведено оцінку застосування запропонованої теорії для вирішення надійної експлуатації вантажних машин у важких дорожніх умовах. Особливу увагу автори звертають на майбутнє впровадження запропонованої теорії, а саме, реалізацію у військовій та цивільній сферах.

Ключові слова: прохідність, теорія, оптимізація геометрії, коефіцієнт зчеплення, маневреність, вантажний автомобіль.

Постановка проблеми. Конструкція колісного рушія з автомобільною шиною – складна, багатифункціональна конструкція. Основним призначенням колісного рушія з автомобільною шиною є не тільки зменшення динамічних поштовхів і ударів, які можуть передаватися на підвіску авто-

мобіля та дуже важливо це забезпечувати надійне зчеплення ведучого колеса з дорожнім покриттям, керованість, та створювати і передавати на автомобіль дотичні сили тяги і гальмівні сили. Закладені конструкторами та технологами конструкційні елементи в шину в значній мірі визначають

прохідність автомобіля в різних дорожніх умовах, коефіцієнт зчеплення, шум і витрата палива у автомобіля під час його руху [3, 6]. Крім цього, шина, яка одягнена на ведуче колесо повинна забезпечувати довготривалу роботоспроможність, надійність виконання робочого процесу при заданій вантажопідйомності [2]. Це є важливим поєднанням елементів ведучого колеса автомобіля, що поєднує в собі пружну резино-метало-тканинну оболонку. Колісний рушій з автомобільною шиною повинен забезпечити контакт транспортного засобу з фізичними показниками дорожнього покриття, призначений для поглинання незначних коливань, викликаних недосконалістю дорожнього покриття, компенсації похибки траєкторій коліс, реалізації та сприйняття різноманітних сил.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Слід зазначити автори багато [4] уваги приділяли взаємодії шини колісного рушія зі шляхом. Ними було показано, [6] що взаємодія колеса з дорогою відбувається на площині відбитка шини на поверхні дороги (плямі контакту) (рис. 1а, 1б).

В роботі [4] приведено схему сил, що діють на ведуче колесо (рис. 2).

Також в цій же роботі [4] приведена розрахункова схема процесу взаємодії автомобільного колеса з ґрунтом (рис. 3).

ω_0 – колова швидкість осі колеса; ω_k – колова швидкість еластичної периферії шини; M_k – крутний момент прикладений до осі колеса; M – момент тертя; G_k вертикальне навантаження на колесо; $-C_z$ – тангенціальна жорсткість шини; C_x – радіальна жорсткість шини.

В [4] автори привели графічну залежність кутового зміщення зовнішньої частини шини щодо осі колеса від часу при постійній величині кутової швидкості осі колеса і при різних значеннях співвідношення її радіальної й тангенціальної жорсткості.

Метою розробки є вдосконалення технології розгортання плями контакту шини колісного рушія автомобіля та розрахунку процесу такого розгортання шляхом урахування процесу руху точки прикладання сили ваги до плями контакту. Для досягнення поставленої мети сформульовані завдання.

Завдання дослідження: 1. Виконати теоретичний аналіз існуючих методів і підходів дослідження руху плями контакту, навести причини, щодо виявлення недостатньої глибини дослідження руху плями контакту. 2. Розробити геометрію у вигляді ескізної моделі колісного рушія з автомобільною шиною з відтворенням процесів, що відбуваються при розгортанні плями контакту різної геометрії. 3. Надати теоретичний опис процесів змін механічних, динамічних і експлуатаційних характеристик шини колісного рушія у вигляді математичних моделей, що можуть бути використані для прогнозування їх властивостей в процесі роботи. 4. Виготовити вимірювально-випробувальний комплекс із здатністю визначення деформацій шини в точках змін її форми при розгортанні плями контакту різної геометрії з усіх станів деформації навантажених дільниць колеса.

Вантажні автомобілі розроблені для використання в важких дорожніх умовах, таких як бездоріжжя, заболочені місця, піщані або снігові

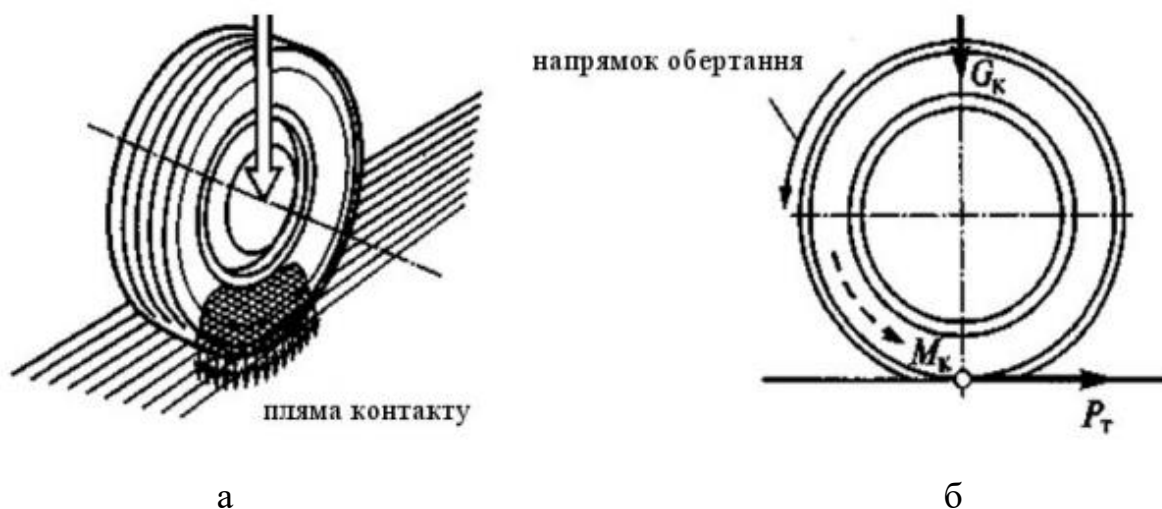


Рис. 1. Взаємодія колеса з дорогою через пляму контакту: а – контакт колісного рушія з дорогою; б – навантаження колісного рушія силовими факторами

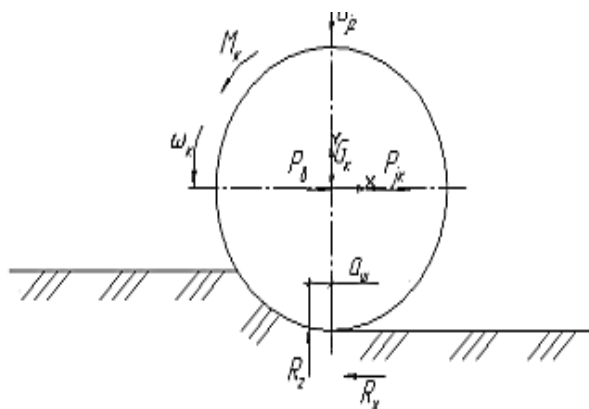


Рис. 2. Схема сил, що діють на автомобільне колесо в ведучому режимі

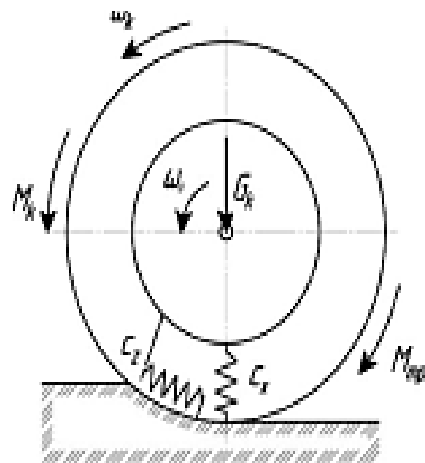


Рис. 3. Розрахункова схема процесу взаємодії ведучого колеса з ґрунтом

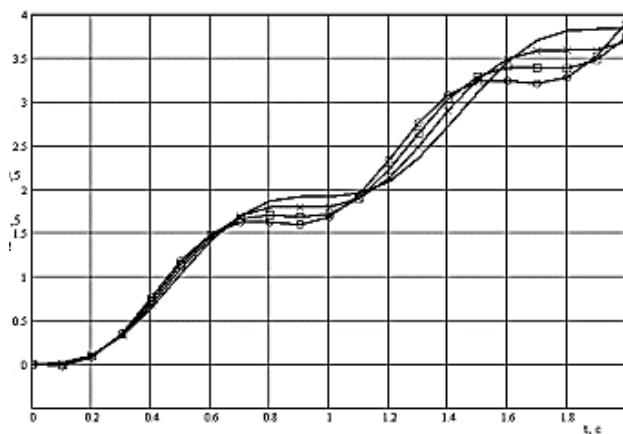


Рис. 4. Залежність кутового зміщення зовнішньої частини шини щодо осі ведучого колеса у часі

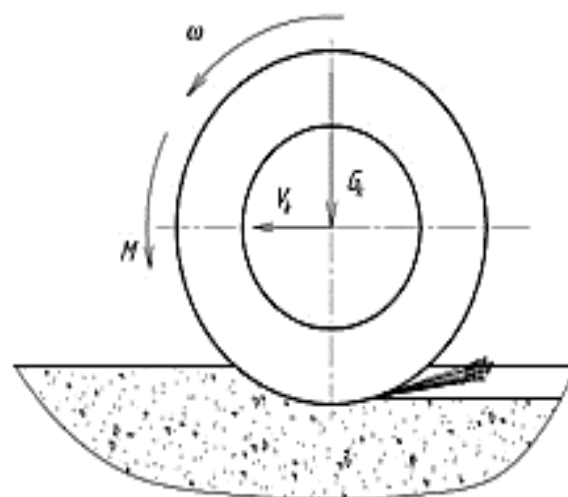


Рис. 5. Розрахункова схема викиду ґрунту із зони контакту колеса з ґрунтом



Рис. 6. Випробовування автомобіля з розширеною зоною плями контакту



Рис. 7. Випробовування автомобіля зі зниженим тиском та збільшеною площиною плями контакту



Рис. 8. Випробовування автомобіля з рідкою плямою контакту



Рис. 9. Випробовування автомобіля зі зниженим тиском в шинах



Рис. 10. Випробовування автомобіля у глибокій колії



Рис. 11. Випробовування автомобіля на піщаному ґрунті



Рис. 12. Випробовування автомобіля на каміннях



Рис. 13. Випробовування автомобіля в гористій місцевості



Рис. 14. Випробовування автомобіля з гусеничним колісним рушієм



Рис. 15. Випробовування автомобіля в засніженій місцевості



Рис. 16. Випробовування автомобіля в гірській місцевості



Рис. 17. Випробовування автомобіля в умовах діагонального вивішування

поверхні. У таких ситуаціях основними факторами, що забезпечують успішний рух, є відмінна прохідність, стійкість на різноманітних типах дорожнього покриття та здатність до ефективного керування.

Враховуючи вище вказані переваги, проблема адаптації автомобілів до різних умов експлуатації можуть бути вирішені за допомогою теорії розкручування плями контакту, що може стати предметом подальшого дослідження даної динаміки з метою розширення її можливостей. На рисунках (6–17) показано адаптування автомобілів до різних умов експлуатації шляхом розкручування плями контакту.

Постановка завдання.

Уявимо собі геометрію кочення колісного рушія з геометрією плями контакту (рис. 18), що може відповідати теорії кочення коліс [1, 5].

На рисунку (19) показано фізичну модель руху плями контакту при обертанні колісного рушія.

P – сила ваги;

OC_0 – плече кочення;

OC – деформована частина шини при контакті з опорною поверхнею та відриву її від опорної поверхні;

α – кут відриву від поверхні плями контакту;

дуга OC – умовно недеформована частина колісного рушія.

Згідно з (рис. 19) динамічне розкручування плями контакту OC починається з прикладання до колісного рушія -1 сили ваги P , при цьому розкручування починається з моменту точки C_0 у вздовж геометрії плями контакту з положення C_0 у вздовж ваги спотвореної плями контакту по прямій OC зі швидкістю v , яка складає частку довжини плями контакту та її пропорційною:

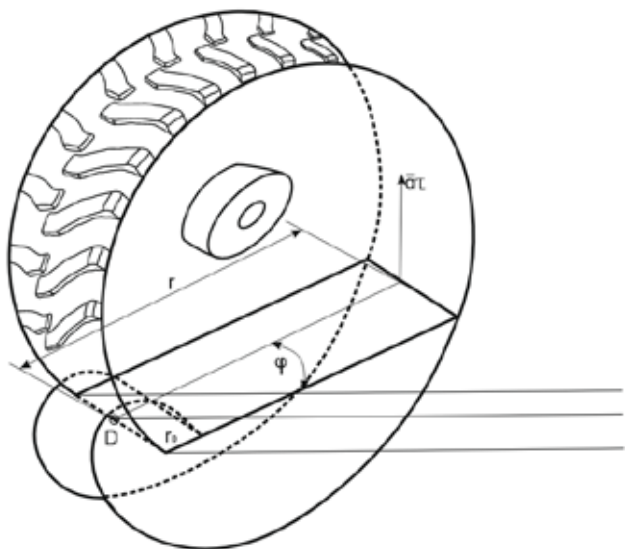


Рис. 18. Геометрія руху плями контакту

$$OC = r$$

Тоді можна записати:

$$V = K * r$$

При цьому маємо на увазі, що при $t_0=0$ тобто в момент часу D, $r = r_0$.

Також накладаємо умови, що площа плями контакту відповідна їй лінія OC обертається в площині рисунка. Пляма OC при обертанні колісного рушія 1 та її розкручування утворює з віссю X кут α :

$$\alpha = \omega t$$

$\omega - \omega = const$ — кутова швидкість колісного рушія.

Виклад основного матеріалу. Так як рух точки C_0 плями контакту відбувається на площині, тому визначимо закон руху плями контакту використовуючи попарні координати r і α .

Тоді радіальна проекція швидкості буде мати вигляд

$$V_r = \frac{dr}{dt} = V = Kr \quad (1)$$

Обидві частини рівняння (1) поділимо на r та помножимо на dt .

Звідки з формули (1)

$$\frac{dr}{r} = K dt \quad (2)$$

Складаємо інтегральне рівняння

$$\int_{r_0}^r \frac{dr}{r} = \int_0^t K dt \quad (3)$$

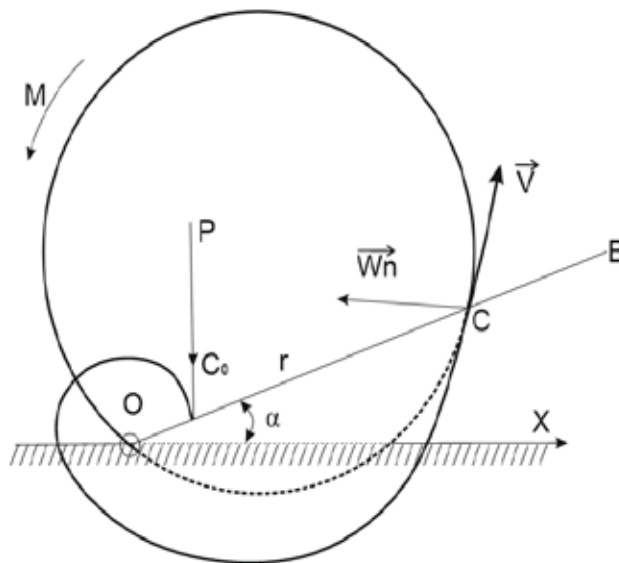


Рис. 19. Фізична модель геометрії руху плями контакту при коченні колісного рушія

З інтегрального рівняння (3) маємо

$$\ln \frac{r}{r_0} = Kt \quad (4)$$

З рівняння (4) отримуємо

$$r = r_0 e^{Kt} \quad (5)$$

Рівняння (5) буде рівнянням руху плями контакту (умовної точки C) у полярних координатах

$$r = r_0 e^{Kt} \quad (6)$$

$$\alpha = \omega t \quad (7)$$

З рівняння для кута повороту α вилучимо складову t

$$t = \frac{\alpha}{\omega}$$

Та підставимо це значення у рівняння для r_0 отримаємо рівняння для руху плями контакту та її розгортання відносно опорної поверхні

$$r = r_0 \cdot e^{\frac{K}{\omega} \alpha} \quad (8)$$

Рівняння (8) показує, що розгортання плями контакту відбувається по логарифмічній спіралі.

Будемо визначати швидкість та прискорення розгортання плями контакту за 2-х радіальними та трансверсальними проекціями:

$$\text{швидкість } V_r = r = r_0 K e^{Kt} = Kr;$$

$$V_\varphi = r \dot{\varphi};$$

$$\text{Прискорення } W_r = \dot{r} - r \dot{\alpha}^2 = (K^2 - \omega^2) r;$$

$$U\alpha = r \ddot{\alpha} + 2r \dot{\alpha} = 2K\omega r;$$

Так як прийнято, що $\omega = const$, тому $\ddot{\alpha} = 0$.

Тоді швидкість точки буде:

$$V = \sqrt{Vr^2 + V\alpha^2} = r\sqrt{K^2 + \omega^2},$$

а величина прискорення

$$W = \sqrt{Wr^2 + W\alpha^2} = r\sqrt{(K^2 - \omega^2)^2 + 4K^2\omega^2} = (K^2 + \omega^2) \cdot r$$

Дотичне прискорення розібране плями контакту визначимо за формулою:

$$W\tau = \frac{dv}{dt} = \sqrt{K^2 + \omega^2} \cdot r = Kr\sqrt{K^2 + \omega^2} \quad (9)$$

Нормальне прискорення розгортання плями контакту визначаємо з формули:

$$Wn = \sqrt{W^2 - W\tau^2} = \sqrt{(K^2 + \omega^2)r^2 - K^2r^2(K^2 + \omega^2)} = r\omega\sqrt{K^2 + \omega^2} \quad (10)$$

Тоді радіус кривизни розгортання плями контакту будемо визначати за формулою

$$\rho = \frac{V^2}{Wn} = \frac{(r\sqrt{K^2 + \omega^2})^2}{r\omega\sqrt{K^2 + \omega^2}} = \frac{r\sqrt{K^2 + \omega^2}}{\omega}$$

Матеріали та методи досліджень. За теоремою Ейлера-Шаля [1] плоский рух вважається як обертальний навколо миттєвого центра обертань, або центра швидкостей.

Полусом є миттєвий центр швидкостей (МЦШ), тобто така точка P рухомої площини, жорстко скріпленої з фігурою, швидкість якої в певний момент часу дорівнює нулю $\vec{V}_P = 0$.

Тоді, $V_B = V_{BP} = \omega \cdot BP$ тобто швидкість будь-якої точки фігури дорівнює за величиною добутку модуля кутової швидкості фігури на відстань від цієї точки до МЦШ та спрямована перпендику-

лярно до цього відрізка проти напрямку годинникової стрілки, якщо $\omega > 0$ і навпаки.

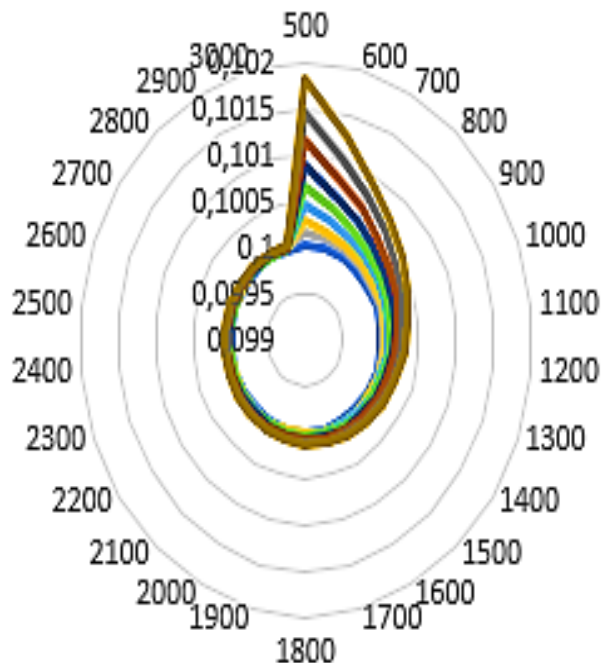


Рис. 20. Логарифмічна діаграма розкручування плями контакту колісного рушія.

Висновки. Використання в матеріалах статті теореми Ейлера-Шаля шляхом теоретичних розрахунків до руху плями контакту колісного рушія доводить, що деформована частина шини при розгортанні має плоский рух як обертальний навколо миттєвого центра обертань в точці прикладення сили ваги автомобіля.

Вперше авторами було отримано формулу кривизни розгортання плями контакту колісного рушія автомобіля з опорною поверхнею.

Список літератури:

1. Федотов В. О., Віштак І. В., Молодецька Т. І. Теоретична та прикладна механіка. (Технічна механіка) Самостійна та індивідуальна робота студентів. Частина 1. – 2017.
2. Шевченко С.І., Полупан Є.В. Аналіз впливу механічної характеристики приводу при гальмуванні на динамічні навантаження. Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2019. № 2, (250). С. 125–130.
3. Петров Л.М., Кішянус І.В., Скоріченко О.І. Проект автомобіля з додатковим реактивним поштовхом у зоні плями контакту колісного рушія з опорною поверхнею: монографія. Рига: Baltija Publishing. 2019. С. 229–246.
4. Опанасюк Є. Г., Бегерський Д. Б. До визначення сил, що діють на автомобільне колесо при буксуванні. – 2016. Опанасюк Є. Г. До визначення сил, що діють на автомобільне колесо при буксуванні // Вісник ЖДТУ. Серія «Технічні науки». – 2016. – №. 1 (76). – С. 128–137.
5. Leontiev D., Don E. Specifics of automobile dual wheels interaction with the supporting surface // Автомобильный транспорт. – 2016. – №. 39. – С. 74–79.
6. Автомобілі. Теорія експлуатаційних властивостей : навчальний посібник / В. В. Біліченко, О. Л. Добровольський, В. О. Огневий, Є. В. Смирнов – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 163 с.

Petrov L.M., Petryk Yu.M., Borisenko T.M. L.M. PETROV'S THEORY WITH APPENDICES BY PETRYK AND BORYSENKO USING THE EULER-SCHAL THEOREM FOR THE WHEEL PROPULSION OF A CAR

The article by authors L.M. Petrov, Y.M. Petryk, T.M. Borysenko presents a theoretical development of improving the technology of deploying the contact patch of a tire of a wheeled vehicle and calculating the process of such deployment by taking into account the process of movement of the point of application of gravity to the contact patch. An analysis of current research in the given scientific direction was conducted, as well as an analysis of modern scientific and technical solutions for the conditions of vehicle movement using wheel drives, as well as the influence of the dynamics of the deployment of the wheel drive contact patch on the operating parameters of the vehicle movement.

Special attention is paid to optimizing the parameter of the length of the contact patch of the wheel drive tire with the supporting surface to achieve the greatest efficiency on various types of road surfaces, as well as in off-road conditions, which is most characteristic of trucking equipment. A theoretical analysis of the pressure on the surface depending on the tire size of the wheel was performed, as well as an assessment of the change in the coefficient of adhesion in different road conditions and its effect on the length of the contact patch. The effect of the parameters of the wheel drive on the dynamic behavior of the vehicle was considered: increasing or decreasing the radius of curvature of the contact patch deployment.

A physical and mathematical model of the deployment of the contact patch relative to the supporting surface is presented, as well as technical solutions for automatic adjustment of the contact patch of the tire of a wheeled vehicle, which allow adapting to different road conditions without the need to stop the vehicle. The article also draws attention to the technical side of implementing the technology for assessing the movement of the contact patch depending on the passport data of the tire manufacturing.

A comparative review of existing theoretical studies of the dynamics of contact patch motion and the proposed theory of dynamic deployment of the contact patch of a truck wheel drive tire was conducted. The results of calculating the main parameter of contact patch deployment are presented, which show the effectiveness of using this theory to improve the operation and maintenance of a cargo vehicle.

The application of the proposed theory to solve the problem of reliable operation of trucks in difficult road conditions is assessed. The authors pay special attention to the future implementation of the proposed theory, namely, its implementation in the military and civilian spheres.

Key words: cross-country ability, theory, geometry optimization, adhesion coefficient, maneuverability, truck.

Дата надходження статті: 04.07.2025

Дата прийняття статті: 11.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025