

**Л.В. Крайник<sup>1</sup>, М.Г. Грубель<sup>2</sup>, Я.М. Мазурик<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup>Національний університет «Львівська Політехніка»  
<sup>2</sup>Академія сухопутних військ імені Петра Сагайдачного  
**МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ КОЛЕСА З ОПОРНОЮ  
 ПОВЕРХНЕЮ ЩО ДЕФОРМУЄТЬСЯ**

*Для автомобілів, що рухаються в умовах бездоріжжя і на ґрунтових, піщаних опорних поверхнях що деформуються. Представлено математичну модель динаміки колеса з врахуванням додаткових затрат енергій на деформацію (уцілювання) та зріз і переміщення поверхні, пробуксовування колеса впливу характеристики шини і динамічного перерозподілу навантаження на вісь у процесі руху.*

**Л.В. Крайник<sup>1</sup>, М.Г. Грубель<sup>2</sup>, Я.М. Мазурик<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup>Национальный университет «Львовская Политехника»  
<sup>2</sup>Академии сухопутных войск им. Петра Сагайдачного  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕСА  
 С ОПОРНОЙ ДЕФОРМИРУЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

*Для автомобилей, движущихся в условиях бездорожья и на ґрунтовых, песчаных опорных поверхностях деформируемых. Представлена математическая модель динамики колеса с учетом дополнительных затрат энергии на деформацию (уплотнения) и срез и перемещения поверхности пробуксовки колеса влияния характеристики шины и динамического перераспределения нагрузки на ось в процессе движения.*

**L. Kraaynyk, M. Hrubel, Y. Mazuryk**  
<sup>1</sup>National University «Lviv Polytechnic»  
<sup>2</sup>Army Academy named Sagaidachnogo  
**MODELLING OF WHEEL INTERACTION  
 WITH THE DEFORMABLE SUPPORTING SURFACE**

*For cars moving in off-road and on dirt, sand deformable bearing surface. The mathematical model of the wheel with additional costs of energy on deformation (compaction) and cut and moving surface characteristics influence slipping wheels and tires dynamic redistribution axle load during movement.*

### **Вступ**

Дослідно-конструкторські роботи по повнопривідних автомобілях багатоцільового призначення і особливо актуальній Україні. Разом з тим слід констатувати що з часів СРСР основні наукові школи у цій сфері були зосереджені за межами України. Відповідно за винятком хіба що окремих досліджень ще на межі 1970-1980р [1] питання параметричної оптимізації привід і оцінки експлуатаційних властивостей повнопривідних автомобілів багатоцільового призначення, що передбачають регулярну експлуатацію і поза межами асфальтобетонних доріг залишаються маловивченими, наукова школа щодо даної тематики практично відсутня.

### **Постановка завдання**

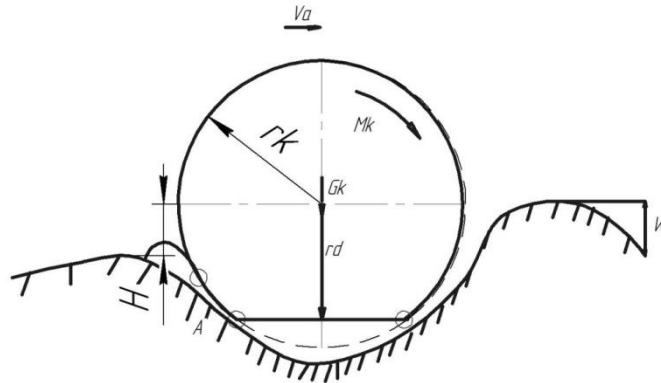
Метою даної статті є формування математичної моделі взаємодії шини автомобіля з опорною деформуючою поверхнею з умов подальшого моделювання руху і визначення паливошвидкісних характеристик та оцінки прохідності повнопривідного автомобіля.

### **Основна частина**

Дорожні умови експлуатації повнопривідних багатоцільових автомобілів, насамперед військового призначення у СНД відчутно відрізняються, як і від автомобілів і автобусів загального призначення, так і від типових умов руху машин аналогічного класу ЄС та США у плані значно нижчої питомої частини сумарного пробігу на дорогах I та II категорії з асфальтобетонним покриттям біля 20% , решту сумарного пробігу роз приділяти у сучасній практиці проектування машин цього класу у РФ приблизно розподіляти 10% бездоріжжя, 40% ґрунтові дороги, 30% дороги з щебеневином, гравійним, піщаним покриттям [2].

Очевидно, що у порівнянні з аналогічним для теорії руху автомобіля деформації шини на жорсткій поверхні ці умови руху обумовлюють розгляд ще 2-х моделей взаємодії пневматичної шини з опорною поверхнею – деформація ґрунту при відсутній деформації шини та одночасна деформація шини і опорної поверхні. Остання якраз і є характеристикою для шин з централізованою системою регулювання тиску повітря. Обидві інші моделі можна розглядати як

спрошені власне даної ситуації. Очевидно також, що на механічну взаємодію шини з поверхнею, що деформується, окрім вертикального навантаження на колесо і характеристики самої шини суттєво впливатиме режим роботи – ведене чи ведуче колесо. В останньому випуску террамеханіка руху взаємодії відчутно ускладнюється додатковим, окрім деформації ґрунту, шини, ефектом зрізу, переміщення частин ґрунту та пробуксовування коліс ( а відповідно і збільшення опору рухові). Узагальнена схема взаємодії ведучого колеса , шини з поверхнею, що деформується представлена на рис.1



**Рис.1. Розрахункова схема взаємодії еластичного колеса з опорною поверхнею, що деформується**

Слід також зауважити, що для опорних деформованих поверхонь(за нечастими винятками) характерним є також практична відсутність мікропрофеля, типового для автодоріг I- категорії, а відповідно всі нерівності з довжини хвилі 100м Е4 відповідності до характеристики мікропрофелю [1] і очевидно теж відчутно впливають на деформування коливань опору рухові.

Таким чином з огляду і аналізу принаймі основних досліджень по террамеханіці руху пневматичної шини [3-7] можна виділити окрім еластичного коефіцієнта опору кочення шин  $f_k$  базові складові сумарного опору рухові з складовою залежності від швидкості руху  $V_a$  енергозатрат:

- На деформацію механіки ґрунту  $f_d$  (А з рис.1)
- На зріз переміщення ґрунту з-за пробуксовуючи ведучих коліс А,рис1
- На переборення локальних нерівностей (підйомів, спусків) типових для мікропрофілю доріг без твердого покриття  $f_h$  (Н,рис1)

Механіка зрізу да деформація ґрунту , як опорної поверхні, базується на узагальненні і аналітичних описаних емпіричних даних, що враховуються, як фізико механічні властивості (пружність, тертя в ґрунті, фільтрація вологи, вологість і т.д.), а також характеристики самої шини(діаметр, ширина та глибина профілю, жорсткість каркасу, тиск повітря і т.д. ). Відомо відповідно два десятки залежностей математичних моделей опису деформації (ущільнення та зрізу опорних поверхонь[7,8]), що обумовлюють необхідність отримання відповідних емпіричних коефіцієнтів для конкретних типів опорних поверхонь і шин та умов їхнього навантаження(вертикального навантаження, внутрішній тиск у шині, велечина підведеного крутного моменту і т.д.). У північноамериканських та західноєвропейських дослідженнях, переважає методологія розрахунку взаємодії шини та опорної поверхні, що базується на емпіричних залежностях (М. G. Bekker) та Дж. Вонг(J. Y. Wong)[3-6], у російських дослідженнях Я. С. Огиткіна [7-9]. З практичного досвіду по оцінці впливу 4 типів опорних поверхонь на витрату палива повнопривідних автомобілів (на базі Яворівського полігону) можна констатувати, що з умов наявності, як характеристики шин для багатоцільових машин у СНД так і емпіричних даних по характеристиках опорних поверхонь з умов достатньої адекватності дорожніх випробовувань та комп'ютерного моделювання є розрахунок додаткового опору рухові від деформації/ущільнення ґрунту(на базі залежності М. Беккера [3,4,7]):

$$f_g = \frac{3}{(\mu+1)(3-\mu)} \sqrt{\frac{h}{D_k}} de \quad h = \frac{\mu p}{c_0} \quad (1)$$

Складова додаткова опору рухові ведучого колеса від зміщення/зрізу ґрунту апроксимується емпіричною залежністю :

$$f_b = 3 \cdot \left[ 0,25 \cdot K_\varphi \cdot \frac{\varphi_\pi}{\varphi} + 0,125 \left( K_\varphi \cdot \frac{\varphi_\pi}{\varphi} \right)^2 \right]$$

Де  $h$  – глибина створюваної колії  $D_k$  – діаметр колеса,  $\mu$  – емпіричний коефіцієнт характеристики пластичності ґрунту,  $p$  – тиск в контакті колесо-опорна поверхня (вельчина вертикального навантаження на колесо розділена на площу контакту що залежить від  $m$ )  $C_0$  коефіцієнт ущільнення,  $\varphi_\pi$  – фактичний коефіцієнт повздовжнього зчеплення з дорогою,  $\varphi$  – коефіцієнт зчеплення шин з дорогою,  $K_\varphi$  – коефіцієнт зчипної маси автомобіля.

Враховуючи складові додаткового опору рухові обумовленої нерівностями дороги  $f_n$ , краще всього здійснити на базі емпіричної залежності, що характеризують прямо пов'язані додаткові затрати енергії на переміщення, роботу елементів підвіски на базі емпіричної залежності, запропонованої професором Говорущенком:

$$f_n = \left[ \psi_1 \frac{s^2 v_a}{G_a} + \psi_2 \frac{s}{G_a} \right],$$

$$\psi_1 = 3,3 \cdot 10^{-7} c + 2,26 \cdot 10^{-7}$$

$$\psi_2 = 0,56 \cdot 10^{-4} R_p$$

Очевидно, що необхідна значна база емпіричних характеристик опорної поверхні, що у залежності від типу і стану насамперед вологості ґрунту піщаних доріг/бездоріжжя змінюваним у широкому діапазоні [3,4,7,9]. Очевидно що при визначенні глибини колії  $h$  і площі контакту шини з поверхнею необхідно враховувати характеристики шин – окрім діаметра та ширини протектора, радіальну та тангенціальну жорсткість шини у взаємозв'язку з внутрішнім тиском повітря, рисунок і висота протектора. Визначним чином ці фактори формулюють і класичну складову опору рухові кочення шини у нелінійному зв'язку з швидкістю руху.

Загалом програма комп'ютерного моделювання розрахунку взаємодії колеса з деформованою опорною поверхнею формується з послідовних 7 блоків підпрограм (включно розрахунок сил зчеплення та величини пробуксовування колеса при заданих значеннях підведеного крутного моменту). Однак вона є тільки частиною програми моделювання руху автомобіля у цілому [8], що базується принаймі на двовимірній динамічній еквівалентній моделі – з врахуванням динамічного перерозподілу навантаження на осі (і враховує пружно-демпфуючі характеристики підвіски) та характер кінематичного зв'язку трансмісії щодо розподілу силового потоку (характеристики диференціалів, варіанти блокування між осевих диференціалів, характеристики автоматики системи, протибуксувальної системи). Очевидно, що ефект ущільнення ґрунту – формування глибини колії колесам передньої осі обумовлює зміну характеристик – опору деформації ґрунту для кожної з наступних осей.

Для оцінки паливно-швидкісних характеристик руху та параметричної оптимізації нижнього передатного діапазону трансмісії модель можна вважати достатньо адекватною, однак моделювання оцінки прохідності машини з найближчими до реалій неоднаковим опором рухові і мікропрофілем поверхні по лівому і правому бортах обумовлює перехід до 3D моделі з врахуванням роботи між колісних диференціалів та поперечних кренів кузова, перерозподілу навантаження по бортах і відповідно відсутнього складнішого структурного алгоритму моделювання.

Враховуючи різні зростання швидкості і операційних можливостей сучасної комп'ютерної техніки практичний інтерес до методології оптимізації вибору конструктивних параметрів і характеристик силового приводу колісних машин багатопільового призначення (зрештою і для етапу загальної компоновки розподілу навантажень на осях і т.д.) представляє перехід від детермінованого моделювання руху на конкретному типі і стані опорної поверхні до етохатично-детермінованої моделі що базується на послідовному узагальненні значень коефіцієнтів сумарного опору рухові для 6-8 типів опорних поверхонь [2]. Статичні узагальнення отриманих математичних результатів (з врахуванням ймовірного розподілу питомої значимості тих чи інших умов руху і

стану опорної поверхні ) дозволяє провести попередню оцінку ефективності різних варіантів конструктивних рішень на етапі проектування з наступним уточненням конструкцій.

#### **Висновки**

Параметрична оптимізація силового приводу автомобілів високої, підвищеної прохідності та оцінка паливно-швидкісних характеристик руху в умовах бездоріжжя, ґрунтових і піщаних доріг повинна базуватися на террамеханіці взаємодії пневматичної шини з опорною поверхнею, що окрім звичного опору кочення коліс враховує додатковий опір рухові обумовлений принаймні трьома суттєвими чинниками. На основі огляду і аналізу існуючих досліджень опрацьовано аналітично-емпіричну модель взаємодії колеса з опорною поверхнею, що деформується.

#### **Література**

1. Кошарний Н.Ф. Технично-експлуатаційні властивості автомобілів високої прохідності, Київ, Вища школа 1981-208ст.
2. Проектирования полноприводных колосных машин в 3-х томах/ Б.А. Афонасьев, Б. Н. Белоусев и др., Москва ин. МГТУ им М. С. Баумана, 2008-т.1-496с., т.2-528с., т.3-432с.
3. Беккер М. Введения в теорию систем «местность машина» переклад з англ.// Москва, Машиностроение, 1973р
4. Ипатов А.А., Дзодзенидзе Т.А. Создание новых средств транспортной инфраструктуры, Проблемы и решения//Москва, 2008-272с.
5. Mitschke M. Dynamic of characteristics engine//Berlin-New-York, 1982-321p.
6. Automotive engineering power train, chassis system and vehicle body' Devid A., Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK, pages: 828, 2013
7. Крайник Л.В., Грубель М.Г. Багатофакторна оцінка та нормування паливної економічності вантажних автомобілів/Львів, вид АСВ, 2010-117с.
8. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей //Москва, Машиностроения, 1981-232с.
9. Говорущенко Н.Я. Вопросы теории эксплуатации автомобилей на дорогах с различной степенью ровности покрытий/Харьков, гос. Университет 1964-32с.

Стаття надійшла до редакції 16.05.2016