

# РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ГАЛЬМІВНОГО ШЛЯХУ АВТОМОБІЛЯ ПРИ ЕКСТРЕНОМУ ГАЛЬМУВАННІ

Вінницький національний технічний університет

## Анотація

Розглянуто створення математичної моделі для розрахунку гальмівного шляху автомобіля при екстремому гальмуванні. Врахована залежність гальмівного шляху транспортного засобу від початкової швидкості гальмування та дорожніх умов, так і від тривалості стадій процесу.

**Ключові слова:** математична модель, гальмівний шлях, екстремне гальмування, показники ефективності гальмування, зчипні властивості дорожнього покриття.

## Abstract

The creation of a mathematical model for calculating the braking distance of the car during emergency braking is considered. The dependence of the braking distance of the vehicle on the initial braking speed and road conditions, as well as on the duration of the stages of the process.

**Keywords:** mathematical model, braking distance, emergency braking, braking efficiency indicators, coupling properties of the road surface.

Гальмування автомобіля в різних умовах має свої особливості. В залежності від нерівномірності дії гальмівних моментів, і у зв'язку з цим різними величинами дотичних, бічних і вертикальних реакцій на колесах, воно може тривати з різним сполученням заблокованих і незаблокованих коліс. Гальмівний шлях транспортного засобу залежить як від початкової швидкості гальмування, дорожніх умов, так і від тривалості стадій процесу.

Процес гальмування автомобільного колеса з блокуванням можна умовно розділити на дві стадії: динамічна (кочення без блокування) і статична (ковзання заблокованого колеса).

В динамічній стадії відбувається зростання гальмівної сили на колесі автомобіля від нуля до максимального значення, яке визначається зчипними якостями коліс чи найбільшим тиском робочого тіла в гальмівному приводі. Тривалість динамічної стадії залежить від конструкції приводу, індивідуальних особливостей водія, зчипних якостей коліс з дорогою.

Розглянемо процес екстремого гальмування автомобіля в загальному випадку, беручи до уваги те, що гальмування відбувається при від'єднаному двигуні. Кінетична енергія автомобіля, що поглинається під час одного гальмування, дорівнює

$$\Delta E_k = \frac{\delta \cdot G_a \cdot v_a^2}{2g}, \quad (1)$$

де  $v_a$  – швидкість на початку гальмування;

$\delta$  – коефіцієнт урахування обертових мас (при відключеному двигуні);

$G_a$  – вага автомобіля.

Коефіцієнт урахування обертових мас можна визначити за наступною формулою [6]

$$\delta = 1 + \frac{\sum I_k \cdot g}{r_o^2 \cdot G_a}, \quad (2)$$

де  $\sum I_k$  – сума приведених моментів інерції коліс автомобіля та пов'язаних з ними мас;

$r_o$  – динамічний радіус колеса автомобіля.

При гальмуванні без блокування коліс (гальмування з АБС) основна частина кінетичної енергії автомобіля перетворюється в тепло при терті в гальмівних механізмах. При відсутності АБС у гальмівному приводі перет-

ворення механічної енергії автомобіля в теплову у динамічній стадії відбувається при терті фрикційного елемента гальмівної колодки об металеву поверхню барабану чи диску. Статична стадія характеризується заблокованими колесами, тому механічна енергія у даній стадії перетворюється у теплову при терті шин заблокованих коліс об дорожню поверхню.

Гальмування автомобіля без блокування коліс відбувається при коченні коліс автомобіля по дорожній поверхні з проковзуванням, яке визначається коефіцієнтом  $S$ .

На рис. 1 схематично показано процес гальмування автомобільного колеса без його блокування.

Відстань, яку проходить загальмоване автомобільне колесо при коченні

$$S_{зк} = \omega_k \cdot r_0 \cdot t_z = S_z \cdot (1 - s). \quad (3)$$

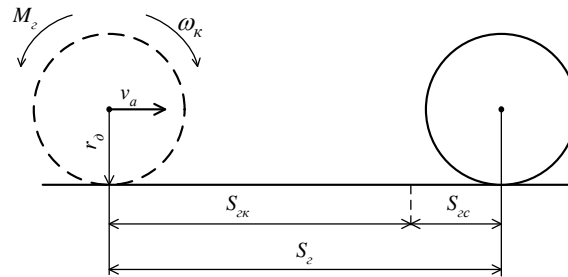


Рисунок 1 – Гальмування автомобільного колеса без блокування

Відповідно, відстань, яку проходить колесо автомобіля в процесі гальмування при ковзанні

$$S_{zc} = S_z - S_z \cdot (1 - s) = S_z \cdot s. \quad (4)$$

Кількість енергії, яка витрачається на подолання підйому при гальмуванні

$$\Delta P = G_a \cdot \sin \alpha \cdot S_z = G_a \cdot i \cdot S_z, \quad (5)$$

де  $i = \tan \alpha = \frac{h}{s}$ , де  $\alpha$ ,  $h$ ,  $s$  – відповідно кут величини ухилу, висота підйому і довжина його по горизонталі.

При гальмуванні на горизонтальній ділянці дороги  $\Delta P = 0$ .

Будь-яку роботу, що входить до рівності (2.21), можна визначити як добуток середньої величини прикладеної сили на переміщення, протягом якого діяла ця сила.

Зі збільшенням проковзування коліс автомобіля роботи сил  $A_r$ ,  $A'_r$ ,  $A_f$  будуть зменшуватися, а при  $s = 1$  („юз“) дорівнюють нулю. При цьому залишається лише робота сил опору повітря та сил тертя ковзання шин автомобіля по дорожній поверхні.

Роботу сил тертя в гальмівних механізмах можна визначити за формулою

$$A_r = \sum_{i=1}^n \frac{M_{zi}}{r_0} \cdot (1 - s_i) \cdot S_z, \quad (6)$$

де  $M_{zi}$  – гальмівний момент на  $i$ -му колесі автомобіля;

$s_i$  – повздовжнє проковзування на  $i$ -му колесі автомобіля.

Робота сил тертя в агрегатах трансмісії [6]

$$A'_r = \frac{M_r}{r_0} \cdot (1 - s_{cp}) \cdot S_z, \quad (7)$$

де  $M_r$  – середній момент сил опору в трансмісії.

$s_{cp}$  – середнє арифметичне значення повздовжніх проковзувань ведучих коліс автомобіля.

Робота сили опору кочення має незначний вплив на процес гальмування на малих швидкостях, завдяки малому значенню коефіцієнта опору коченню. Зі збільшенням швидкості руху він збільшується.

Робота сили опору кочення коліс при гальмуванні без блокування може бути розрахована за формулою

$$A_f = \sum_{i=1}^n G_{ki} \cdot f_i \cdot (1 - s_i) \cdot S_2, \quad (8)$$

де  $G_{ki}$  – нормальне навантаження на  $i$ -те колесо;

$f_i$  – коефіцієнт опору кочення для  $i$ -го колеса автомобіля.

Роботу сил тертя ковзання в контактні шин з дорогою, з врахуванням перерозподілу ваги автомобіля опишемо наступною залежністю

$$A_\varphi = \sum_{i=1}^n R_{zi} \cdot \varphi_{xi} \cdot s_i \cdot S_2, \quad (9)$$

де  $R_{zi}$  – нормальна реакція на  $i$ -те колесо автомобіля;

$\varphi_{xi}$  – коефіцієнт повздовжнього зчеплення  $i$ -го колеса автомобіля.

Щодо роботи сили опору повітря, то на малих швидкостях (до 40 км/год) її частка в загальному балансі сил опору руху незначна. Однак, в діапазоні високих швидкостей сила опору повітря зростає пропорційно квадрату швидкості і повинна враховуватись.

Визначити роботу сили опору повітря можна з наступної залежності [9]

$$A_w = P_{wcp} \cdot S_2, \quad (10)$$

де  $P_{wcp}$  – середнє значення сили опору повітря при гальмуванні автомобіля на шляху  $S_2$ .

При русі автомобіля в нерухомому повітряному середовищі відносна швидкість повітря  $v_w = v_a$ . При присутності вітру відносна швидкість  $v_w$  дорівнює геометричній сумі швидкостей  $v_a$  автомобіля і  $v_\epsilon$  вітру (див. рис. 2)

$$v_w = \sqrt{v_a^2 + v_\epsilon^2 + 2v_a v_\epsilon \cos \beta}, \quad (11)$$

де  $\beta$  – кут між напрямком вітру і повздовжньою віссю (лінія  $I-I$ ) автомобіля.

Середнє значення сили опору повітря при екстремому гальмуванні до зупинки знаходимо, користуючись властивістю визначеного інтегралу „теоремою про середнє”, тоді

$$P_{wcp} = \frac{1}{0 - v_{w0}} \int_{v_{w0}}^0 k_n F v_w^2 dv_w = \frac{1}{3v_w} k_n F v_w^3 \Big|_0^{v_{w0}} = \frac{1}{3} k_n F v_{w0}^2, \quad (12)$$

де  $v_{w0}$  – відносна швидкість повітря в момент натискання на педаль гальм.

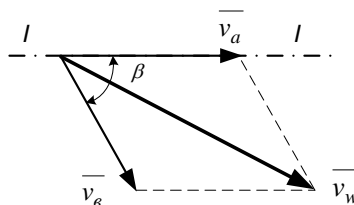


Рисунок 2 – Схема додавання швидкостей вітру та руху автомобіля

Користуючись (12), формулу (10) можна записати наступним чином

$$A_w = \frac{1}{3} k_n F v_{w0}^2 \cdot S_2, \quad (13)$$

Отже, енергетичний баланс автомобіля при екстремому гальмуванні у випадку кочення коліс без блокування прийме наступний вигляд

$$\frac{\delta \cdot G_a \cdot v_a^2}{2g} = \sum_{i=1}^n \frac{M_{zi}}{r_o} \cdot (1-s_i) \cdot S_z + \sum_{i=1}^n R_{zi} \cdot \varphi_{xi} \cdot s_i \cdot S_z + \frac{1}{3} k_n \cdot F \cdot v_{w0}^2 \cdot S_z +$$

$$+ \sum_{i=1}^n G_{ki} \cdot f_i \cdot (1-s_i) \cdot S_z + \frac{M_r}{r_o} \cdot (1-s_{cp}) \cdot S_z \pm G_a \cdot i \cdot S_z \quad (14)$$

Із залежності (2.32) можна вивести формулу для визначення гальмівного шляху автомобіля

$$S_z = v_a \cdot (\tau_{cn} + 0,5\tau_u) + \frac{\delta \cdot G_a \cdot (v_a - 0,5\tau_u \cdot j_{ycm})^2}{2g \left( \sum_{i=1}^n \frac{M_{zi}}{r_o} \cdot (1-s_i) + \sum_{i=1}^n G_{ki} \cdot f_i \cdot (1-s_i) + \frac{1}{3} k_n \cdot F \cdot v_{w0}^2 + \dots \right)}$$

$$\rightarrow \frac{\dots + \frac{M_r}{r_o} \cdot (1-s_{cp}) + \sum_{i=1}^n R_{zi} \cdot \varphi_{xi} \cdot s_i \pm G_a \cdot i}{\dots}$$

Узагальнюючими параметрами, які характеризують гальмівну систему, є:

- гальмівний шлях автомобіля, який характеризує ефективність гальмування;
- відхилення від коридору руху встановленої ширини, яке характеризує стійкість автомобіля в процесі гальмування;
- витрата енергії або робочого тіла в процесі гальмування, а також за відсутності гальмування, що характеризує конструктивні характеристики привода і його герметичність в експлуатації;
- тривалість досягнення в приводі встановленого тиску робочого тіла і його максимальне значення, що характеризує продуктивність привода та його технічний стан.

За результатами експериментальних і статистичних досліджень процесу гальмування на роликівих гальмівних стендах силового типу розроблені наукові основи та методика автоматизованого визначення характеристик: приведення в дію гальмівної педалі в режимі екстреного гальмування; гальмівного механізму кожного колеса автомобіля з гідроприводом як в режимі екстреного, так і повільного гальмування; системи "колесо - опорна поверхня". Характеристики дозволяють прогнозувати показники ефективності гальмування такого автомобіля у стані завантаження до повної маси як на стенді, так і на дорожньому покритті з заданими значеннями коефіцієнта зчеплення.

Розроблено математичну модель гальмування легкового автомобіля на дорожньому покритті за характеристиками, що визначені на стенді, з врахуванням його завантаження, параметрів режиму гальмування та зчіпних властивостей дорожньої поверхні.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гаврилов Е.В. Організація дорожнього руху / Е.В. Гаврилов, М.Ф. Дмитриченко, В.К. Доля. – К.: Знання України, 2007. – 452 с.
2. Дмитриченко М.Ф. Основи теорії транспортних процесів і систем. / М.Ф. Дмитриченко, Л.Ю. Яцківський, С.В. Ширяєва, В.З. Докуніхін // Навчальний посібник для ВНЗ. – К.: Видавничий Дім «Слово», 2009. – 336 с.
3. Доля В.К. Пасажирські перевезення: підручник. / В.К. Доля. – Харків.: Видавництво «Форт», 2011. – 504 с.
4. Поліщук В.П. Організація та регулювання дорожнього руху: підручник. / В.П. Поліщук, О.О. Бакуліч, О.П. Дзюба, В.І. Єрезов та ін. – К.: Знання України, 2012. – 468 с.
5. Подригало М. А. Маневренность и тормозные свойства колесных машин / Под. ред. М.А. Потригаило. – Харьков: ХНАДУ, 2003 – 403 с.
6. Гецович Е.М. Адаптивные тормозные системы армейских колесных / Е.М. Гецович, Том 1 – Харьков: ХПТУ, 1999 – 188 с.
7. Ребедайло В.М. Дослідження впливу маси автомобіля на довжину гальмівного шляху. / В. М. Ребедайло, В. А. Кашканов. // Матеріали V-ї міжнародної науко – технічної конференції «Автомобільний транспорт: проблеми и перспективы». – Севастополь, СевНТУ. -2002 – С.89-93.
8. Волков В. П. Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля / В. П. Волков. – Харків: ХНАДУ, 2003 – 292 с.

**Біличенко Віктор Вікторович**, д-р техн. наук, професор, ректор, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [bilichenko.v@gmail.com](mailto:bilichenko.v@gmail.com);

**Дмитрієва Алла Володимирівна**, інженер кафедри автомобілів і транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [atm.kafedra@gmail.com](mailto:atm.kafedra@gmail.com);

**Поліщук Андрій Олександрович**, студент групи 1АТ-20м факультету машинобудування та транспорту, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [atm.kafedra@gmail.com](mailto:atm.kafedra@gmail.com).

**Bilichenko Victor V.**, Dr. Sc., Professor, Rector, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [bilichenko.v@gmail.com](mailto:bilichenko.v@gmail.com);

**Dmytriieva Alla V.**, engineer of Cars and Transport Management Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [atm.kafedra@gmail.com](mailto:atm.kafedra@gmail.com);

**Polishchuk Andriy O.**, student of 1AT-20m group of the Faculty of Mechanical Engineering and Transport, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [atm.kafedra@gmail.com](mailto:atm.kafedra@gmail.com).