

А. Г. МАМОНТОВ, О. О. ОСТРОВЕРХ, А. П. КОЖУШКО, С. І. КРИВОШАПОВ

МОДЕЛЮВАННЯ НЕРІВНОСТЕЙ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ З УРАХУВАННЯМ ЗГЛАДЖУЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ ШИН

При русі автомобіля по дорогах з різними видами покриття та різного ступеня зношеності виникають коливальні процеси які негативно впливають на продуктивність перевезення пасажирів та вантажів, обмежують швидкість руху та погіршують надійність транспортного засобу. Поліпшення експлуатаційних показників автомобіля потребує поглибленого дослідження взаємозв'язків між транспортним засобом та зовнішнім середовищем. На етапі проектування автомобіля ці дослідження раціонально проводити шляхом імітаційного моделювання за допомогою розрахункових еквівалентних моделей як досліджуваної системи так і зовнішнього впливу на неї. У такий спосіб можливо точніше оцінити конструкторські рішення з точки зору ефективності їх застосування. Тому при дослідженні плавності ходу автомобіля необхідно також враховувати здатність пневматичних шин згладжувати нерівності дороги.

Здатність шини згладжувати нерівності мікропрофілю дороги описано за допомогою передавальної функції динамічної ланки у вигляді диференційного рівняння, яке дозволяє осереднити значення ординати мікропрофілю опорної поверхні по площадці плями контакту пневматичної шини з дорожнім покриттям.

За результатами імітаційного моделювання нерівностей дороги у вигляді випадкової функції шляхом генерації випадкових збурювань по заданих статистичних характеристиках отримано кореляційні функції ординат середнього перетину мікропрофілю, спектральні щільності дисперсій та значення ординати нерівності дорожнього покриття з урахуванням здатності шини згладжувати нерівності дороги для різних типів дорожнього полотна. Що дозволяє підвищити точність розрахунків при математичному дослідженні автомобіля, як коливальної системи, за рахунок моделювання умов взаємодії пневматичної шини з опорною поверхнею максимально наближених до реальних умов впливу на підвіску нерівностей дороги. Та найбільш повно й достовірно визначити параметри плавності ходу та вибрати раціональну конструкцію системи підресорювання транспортного засобу з урахуванням умов експлуатації.

Ключові слова: автомобіль, шина, здатність згладжувати, мікропрофіль доріг, кореляційна функція, спектральна щільність.

A. MAMONTOV, O. OSTROVERKH, A. KOZHUSHKO, S. KRYVOSHAPOV

SIMULATION OF ROAD SURFACE IMPURITIES TAKING INTO ACCOUNT THE SMOOTHING CAPACITY OF TIRES

When vehicle driving on roads with different types of coverage and varying degrees of wear, there are oscillating processes that adversely affect the productivity of passengers and goods, limit speed and impair the reliability of the vehicle. Improving the car's performance requires an in-depth study of the relationship between the vehicle and the environment. At the design stage of the car, these studies are rationally carried out by simulation using calculated equivalent models of both the studied system and external influences on it. In this way, it is possible to more accurately assess the design decisions in terms of their effectiveness. Therefore, when studying the smoothness of the car must also take into account the ability of pneumatic tires to smooth out road bumps.

The ability of the tire to smooth the unevenness of the road microprofile is described by the transfer function of the dynamic link in the form of a differential equation, which allows to average the ordinate of the microprofile of the bearing surface on the area of contact of the pneumatic tire with the road surface.

According to the results of simulation of road roughness in the form of a random function by generating random disturbances according to the given statistical characteristics, correlation functions of ordinates of average cross section of microprofile, spectral densities of variances and values of ordinate of road roughness taking into account the ability of tires to smooth road roughness for different types That allows to increase the accuracy of calculations in the mathematical study of the car as an oscillating system, by modeling the conditions of interaction of the pneumatic tire with the bearing surface as close as possible to the real conditions of impact on the suspension of road bumps. But the most complete and reliable to determine the parameters of smoothness and choose a rational design of the suspension system of the vehicle, taking into account the operating conditions.

Keywords: car, tire, smoothing ability, road microprofile, correlation function, spectral density.

Вступ. Автомобільна техніка широко використовується в народному господарстві для перевезення пасажирів та різноманітних вантажів, деякі з котрих вимагають відповідних умов перевезення. Деякі транспортні засоби не в змозі забезпечити потрібні вимоги в силу своєї

конструктивної недосконалості. А отже виникає потреба в поліпшенні експлуатаційних показників використовуваної техніки, шляхом її модернізації в цілому, або окремих вузлів та систем. Такою системою автомобіля є система підресорювання, яка значно впливає на такі експлуатаційні показники: стійкість, прохідність, надійність, довговічність, та плавність ходу. В більшості випадків саме якість підвіски обмежує швидкість руху автомобіля та схоронність транспортованих вантажів. Вибір раціональної конструкції підвіски неможливий без відповідних інженерних розрахунків, які пов'язані з імітаційним моделюванням з урахуванням умов експлуатації та натурними випробуваннями.

Актуальність проблеми

Основним джерелом коливань самохідних машин являються нерівності поверхні дороги. Отже основною характеристикою дороги можна вважати ступінь рівності її профілю. З урахуванням впливу профілю дороги на автомобіль його поділяють на три складові: макропрофіль, мікропрофіль та шорсткість. Найбільший вплив на коливання самохідної машини оказує мікропрофіль дороги, котрий можна описати як сукупність висот нерівностей, наявність котрих обумовлені видом застосованого матеріалу покриття дороги, а також його технічним станом.

При розрахунку системи підресорювання автомобіля необхідно враховувати умови взаємодії транспортного засобу з зовнішнім середовищем, та забезпечити моделювання умов руху максимально наближені до реальних, а отже при дослідженні плавності ходу та виборі раціональної конструкції підвіски імітаційне моделювання мікропрофілю дороги з урахуванням згладжуючої здатності шин є досить актуальним питанням.

Аналіз останніх досліджень

Нерівності дороги характеризуються своїми геометричними розмірами, формою та характером повторюваності. При русі автомобіля по дорогах можуть зустрічатися такі ділянки, де послідовно розташовані декілька майже однакових гармонійних нерівностей. Тому в більшості наукових праць присвячених дослідженню плавності ходу самохідних машин, з урахуванням того, що шина має здатність згладжувати нерівності дороги мікропрофіль представлено детерміновано, як сполучення окремих нерівностей, котре достатньо точно можна представити в вигляді хвилі синусоїдальної форми

$$q(t) = q_o \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (1)$$

де q_o – амплітуда нерівності; ω – кругова частота кінематичного збурювання.

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot V}{a}, \quad (2)$$

де V – швидкість руху самохідної машини; a – довжина нерівностей.

На сильно зношених дорогах можуть зустрічатися дві або чотири нерівності підряд, котрі близькі за довжиною. Це викликає гармонійне збурювання тому коливання самохідної машини практично встановлюються, зостаються близькими тим, котрі виникають при русі по хвилястому профілю. Такий випадок є найбільш несприятливим оскільки вимушені коливання можуть бути інтенсивнішими ніж коливання викликані випадковим негармонійним збурюванням.

Проведені дослідження різних ділянок доріг [11, 16] показали, що середньоквадратичні ординати нерівностей значно відрізняються від ділянки до ділянки.

Для дослідження нелінійних динамічних систем останнім часом генерують реалізації випадкових збурювань по заданих статистичних характеристиках, або отриманим у результаті обробки експериментальних досліджень.

Формулювання мети дослідження

Для найбільш достовірної оцінки параметрів плавності ходу автомобіля, необхідно змоделювати умови руху максимально наближені до реальних, а це можливо лише при моделюванні збурювань з боку дороги у вигляді випадкової функції з урахуванням згладжуючої здатності шин.

Результати дослідження

При описі основних параметрів мікропрофілю використовують статистичні методи, які здебільшого базуються на нормальному законі розподілу ординат мікропрофілю. Мікропрофіль описується випадковою зміною ординат і довжини нерівностей.

Методика моделювання мікропрофілю у вигляді випадкової функції та основні рівняння моделювання профілю дороги представлені в роботах [3, 6, 7, 12, 14, 15, 17].

При використанні плоскої еквівалентної розрахункової схеми автомобіля профіль поверхні дороги можна описати у вигляді перетину мікропрофілю уздовж дороги. Отже мікропрофіль дороги є випадковою функцією пройденого шляху x . А коливання автомобіля змінюються в часі t і є випадковим процесом. Знаючи, що пройдений шлях x визначається, як добуток швидкості руху V і часу руху t , можна перейти від випадкової функції до випадкового процесу.

Тоді для статистичного опису поздовжнього профілю дороги використовують кореляційну функцію ординат середнього перетину, що має вигляд [1, 13]

$$R_q(x_s) = \sigma_q^2 \cdot \left(A_1 \cdot e^{-\alpha_1|x_s|} + A_2 \cdot e^{-\alpha_2|x_s|} \cdot \cos(\beta \cdot x_s) \right), \quad (3)$$

де σ_q^2 – середньоквадратичні відхилення нерівностей від нульового рівня; A_1, A_2 – безрозмірні коефіцієнти, що характеризують частки експонентної та періодичної складових, відповідно. Сума коефіцієнтів $A_1 + A_2 = 1$; $\alpha_1, \alpha_2, \beta$ – коефіцієнти кореляційного зв'язку для кожного виду профілю.

Причому α_1, α_2 характеризують швидкість загасання кореляційного зв'язку ординат мікропрофілю, а β – гармонійну складову мікропрофілю.

Так само характеристикою мікропрофілю дороги є спектральна щільність дисперсій $S_q(\omega)$ [8, 9], що описує частоту повторення довжин нерівностей, і пов'язана з кореляційною функцією $R_q(x_s)$ перетворенням Фур'є

$$R_q(x_s) = 2 \int_0^{\infty} S_q(\omega) \cos \omega x_s d\omega; \quad (4)$$

$$S_q(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} R_q(x_s) \cos \omega x_s dx_s,$$

де ω – кругова частота кінематичного збурювання.

$$\omega = \frac{2\pi}{a}, \quad (5)$$

де a – довжина нерівності.

При моделюванні руху самохідної машини необхідно переходити від випадкової функції $q(x)$ до випадкового процесу $q(t)$, при цьому, переходити від $R_q(x_s)$ до $R_q(t)$.

$$R_q(x_s) = R_q(\tau), \text{ при } x_s = V \cdot t. \quad (6)$$

Таким чином вираз (3) набуває вигляд

$$R_q(\tau) = \sigma_q^2 \cdot \left(A_1 \cdot e^{-\alpha_1 V |\tau|} + A_2 \cdot e^{-\alpha_2 V |\tau|} \cdot \cos(\beta \cdot V \cdot \tau) \right). \quad (7)$$

Як правило, спектральні щільності визначаються тільки для позитивних частот. З урахуванням зв'язку (4) кореляційній функції та спектральній щільності, її вираження можна представити у вигляді

$$S_q(\omega) = 2 \cdot \sigma_q^2 \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \left(A_1 \cdot \frac{\alpha_1 \cdot V}{\alpha_1^2 \cdot V^2 + \omega^2} + A_2 \cdot \frac{\alpha_2 \cdot V \cdot (\alpha_2^2 \cdot V^2 + \beta^2 \cdot V^2 + \omega^2)}{\omega^4 + 2 \cdot (\alpha_2^2 - \beta^2) \cdot \omega^2 \cdot V^2 + V^4 \cdot (\alpha_2^2 + \beta^2)^2} \right). \quad (8)$$

Числові значення коефіцієнтів апроксимації кореляційної функції типів мікропрофілю доріг за даними робіт [2, 4, 13] представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Числові значення коефіцієнтів апроксимації кореляційної функції

Покриття	σ_q , см	A_1	A_2	α_1 , 1/с	α_2 , 1/с	β , 1/с
Асфальт	0,8-1,26	0,85	0,15	-0,2	-0,05	0,6
Асфальт (дорога в гарному стані)	0,815	0	1	0	0,13	1,05
Асфальт (дорога в зношеному стані)	1,1	0,85	0,15	0,2	0,05	0,6
Ґрунтова польова по колії	2,12	0	1,0	0	0,58	0,63

При формуванні реалізації мікропрофілю дорожнього полотна використовуємо алгоритм, заснований на лінійному перетворенні послідовності $\xi(t)$ незалежних чисел, у послідовність $q(t)$ з заданими характеристиками. Для отримання дискретних значень висот мікропрофілю, котрі відповідають шагу дискретизації застосуємо формуючий лінійний фільтр, котрий описується як динамічна система, яка складається з диференціальних рівнянь першого порядку

$$\begin{cases} \dot{x} = y + \zeta_2 \cdot \xi(t); \\ \dot{y} = -(\alpha_2^2 + \beta^2) \cdot x - 2 \cdot \alpha_2 \cdot y + [\sqrt{\alpha_2^2 + \beta^2} - 2 \cdot \alpha_2] \cdot \zeta_2 \cdot \xi(t); \\ \dot{z} = -\alpha_1 \cdot z + \zeta_1 \cdot \xi(t). \end{cases} \quad (9)$$

де $\zeta_1 = A_1 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_q^2 \cdot \alpha_1}{\tau}}$, $\zeta_2 = A_2 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_q^2 \cdot \alpha_2}{\tau}}$ – коефіцієнти, котрі характеризують профіль дорожнього покриття; $\xi(t)$ – дискретний білий шум; τ – шаг інтегрування.

Реалізація ординати нерівності дорожнього покриття $q(t)$ визначається виразом

$$q(t) = x(t) + z(t). \quad (10)$$

В якості дискретного білого шуму, при реалізації ординат мікропрофілю дорожнього покриття, використовувались значення стандартного генератора білого шуму «Band-Limited White Noise» середовища «Simulink» пакету «Matlab» з потужністю «Noise Power» – 0,1, та значенням дискретності часу «Sample time» – 0,1 [5, 10, 18, 19, 20].

Шина з дорожнім покриттям взаємодіє по площі, яка обумовлена величиною плями контакту, та одночасно охоплює декілька нерівностей полотна дороги та згладжує їх. Це обумовлює здатність шини знижувати зовнішній вплив, котрий передається зі сторони дороги на самохідну машину.

Так в роботах [4] присвячених дослідженню здатності шини згладжувати нерівності мікропрофілю, вертикальний вплив дороги на колесо виражається середнім значенням функції мікропрофілю на довжині відбитка шини, та описується наступним чином

$$q_{cr}(x) = \frac{1}{l_{ш}} \int_{l_{ш} 1+0,5l_{ш}}^{1+0,5l_{ш}} q(x) dx, \quad (11)$$

де $q_{cr}(x)$ – осереднена ордината нерівності дороги по площадці контакту шини з опорною поверхнею; $l_{ш}$ – довжини плями контакту; $q(x)$ – функція котра описує мікропрофіль в повздовжньому напрямку.

Отже здатність шини згладжувати нерівності мікропрофілю задіється у вигляді передавальної функції динамічної ланки, входом котрої є ордината мікропрофілю опорної поверхні, а виходом – його осереднене значення по площадці плями контакту. Цій динамічній ланці відповідає диференціальне рівняння наступного вигляду

$$\ddot{q}_{cr}(t) + \sqrt{2} \cdot K_{пл} \cdot \dot{q}_{cr}(t) + K_{пл}^2 \cdot q_{cr}(t) = K_{пл}^2 \cdot q(t), \quad (12)$$

де $K_{\text{шл}}$ – коефіцієнт, котрий визначається за формулою

$$K_{\text{шл}} = (0,9 \dots 1,3) \cdot \frac{V}{2 \cdot l_{\text{ш}}}, \quad (13)$$

де V – швидкість руху самохідної машини.

Довжина плями контакту шини розраховується за формулою

$$l_{\text{ш}} = 2 \cdot \sqrt{0,1 \cdot H_{\text{ш}} \cdot (D_{\text{ш}} - 0,1 \cdot H_{\text{ш}})}, \quad (14)$$

де $H_{\text{ш}}$ – висота профілю шини; $D_{\text{ш}}$ – діаметр шини.

Результати моделювання мікропрофілю доріг у вигляді випадкової функції шляхом генерації випадкових збурювань по заданих статистичних характеристиках, котрі відповідають різним дорожнім покриттям наведено на рисунках 1–3.

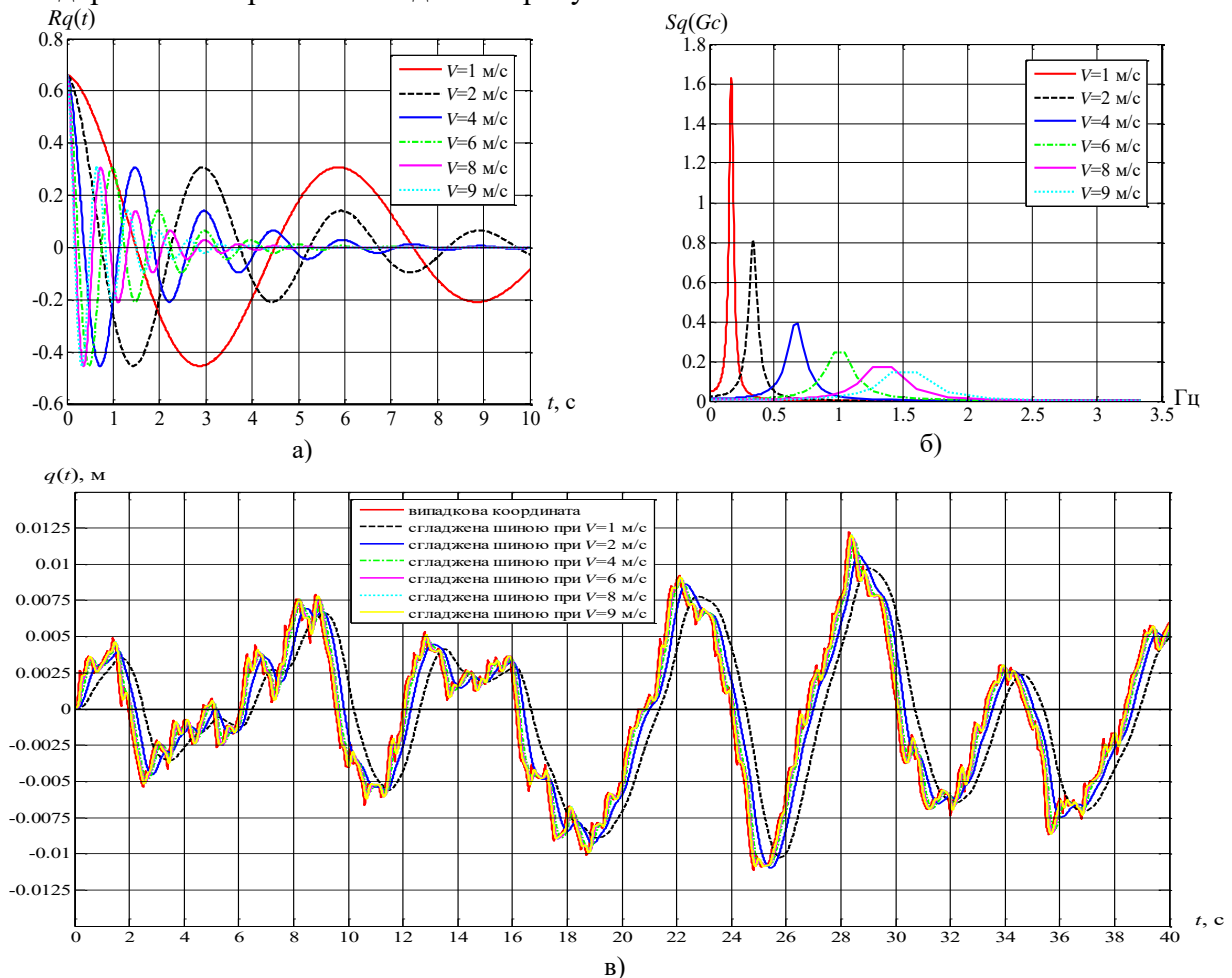


Рис. 1 – Результати моделювання мікропрофілю дороги з асфальтним покриттям у гарному стані у вигляді випадкової функції:

а – кореляційна функція ординат середнього перетину; б – спектральна щільність дисперсій; в – реалізація ординати нерівності дорожнього покриття з урахуванням здатності шини згладжувати нерівності мікропрофілю.

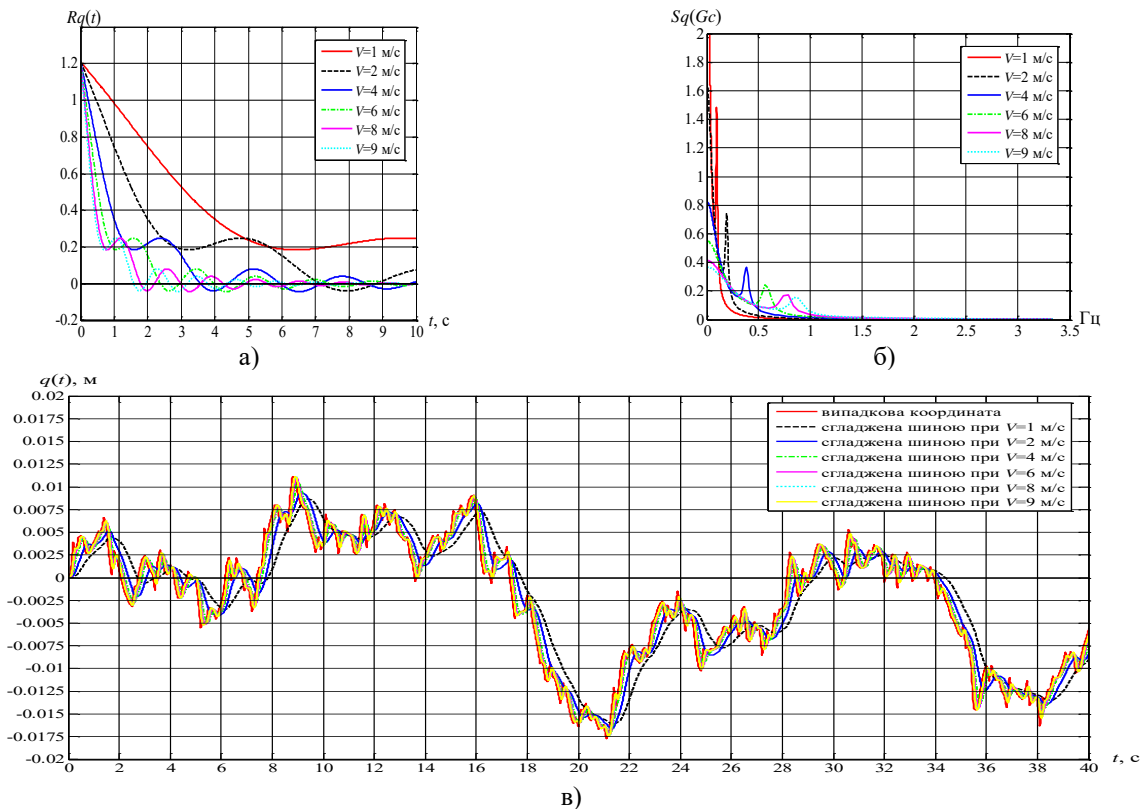


Рис. 2 – Результати моделювання мікропрофілю дороги з асфальтним покриттям у зношеному стані у вигляді випадкової функції:

а – кореляційна функція ординат середнього перетину; б – спектральна щільність дисперсій; в – реалізація ординати нерівності дорожнього покриття з урахуванням здатності шини згладжувати нерівності мікропрофілю.

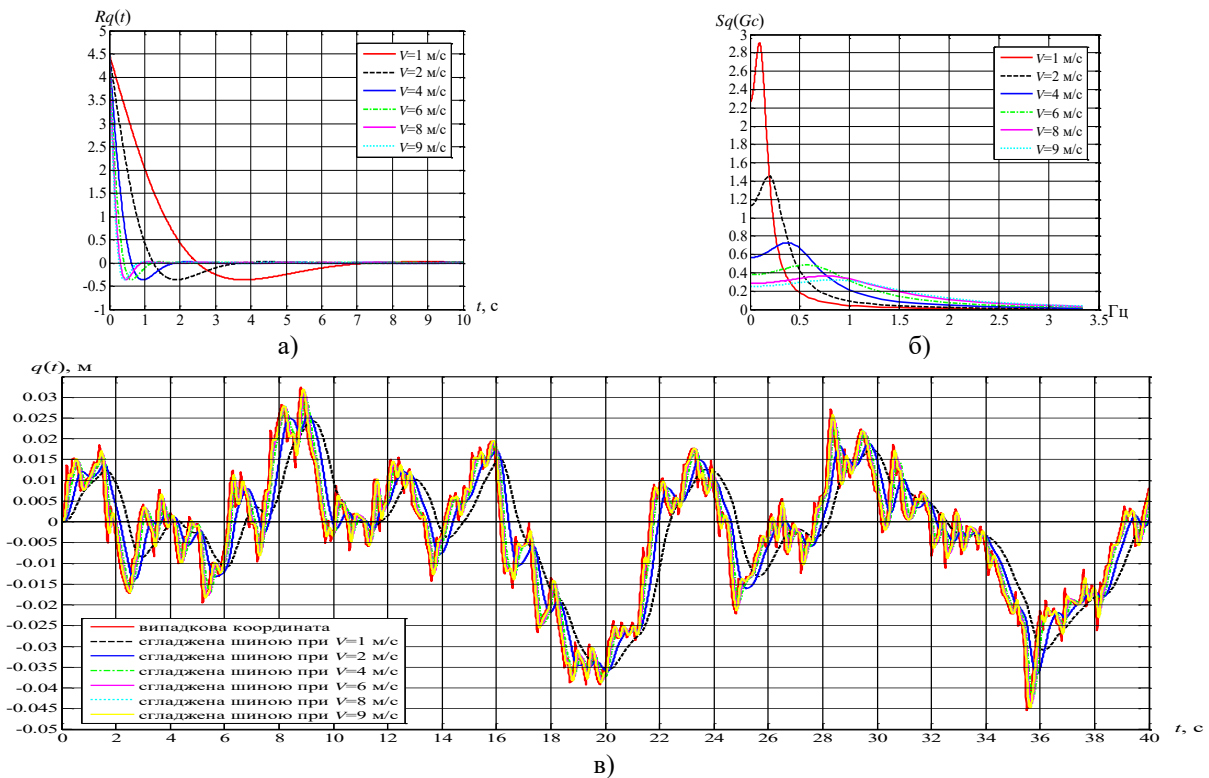


Рис. 3 – Результати моделювання мікропрофілю дороги з ґрунтовим покриттям у вигляді випадкової функції:

а – кореляційна функція ординат середнього перетину; б – спектральна щільність дисперсій; в – реалізація ординати нерівності дорожнього покриття з урахуванням здатності шини згладжувати нерівності мікропрофілю.

Висновки. Запропонована методика моделювання мікропрофіля доріг з покриттям різного типу у вигляді випадкової функції шляхом генерації випадкових збурювань по заданих статистичних характеристиках, котрі відповідають різним дорожнім покриттям, з урахуванням згладжуючої здатності шин, дозволяє змоделювати умови руху автомобіля максимально наближені до реальних, та дати більш якісну оцінку параметрів плавності ходу.

Список літератури

1. Богомолов В. О. Моделювання дорожньої поверхні для розрахунку динаміки руху транспортних засобів / В. О. Богомолов, В. І. Клименко, А. І. Штлов та ін. // Автомобільний транспорт, 2011. – Вип. 29. – С. 37–42.
2. Бур'ян М. В. Плавність руху автобусів у взаємозв'язку з характеристиками підвіски та сидінь [Електронний ресурс] : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.22.02 : галузь знань 13 / Михайло Володимирович Бур'ян ; наук. керівник Крайник Л. В. ; Нац. ун-т "Львівська політехніка". – Львів, 2020. – 151 с. – Бібліогр.: с. 132-151. – укр.
3. Говорущенко Н. Я. Системотехніка транспорту / Н. Я. Говорущенко, А. Н. Туренко. – Харків : ХГАДТУ, 1998. – 255 с.
4. Динаміка руху колісних тракторів : монографія / Б. І. Кальченко [та ін.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : Мірошниченко О. А., 2021. – 320 с. : іл. – Режим доступу: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/55593>
5. Калюжний О. Я. Моделювання систем передачі сигналів в обчислювальному середовищі MATLAB-Simulink: Навч. посіб. – К.: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2004. – 136 с.
6. Кузьо І. В Simulation micro profile road in dynamics problems wheeled vehicles / І. В Кузьо, Ю. В. Залуцький, О. В. Житенко. Моделювання мікропрофілю дороги в задачах динаміки колісних машин Житенко. // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. - 2016. - № 838. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPDM_2016_838_27
7. Ларін О. О. Математичне моделювання коливань спеціалізованого транспортного засобу з дворівневою нелінійною системою підресорювання при переїзді одиначної дорожньої нерівності / О. О. Ларін, В. М. Баштовий, Р. О. Кайдалов та інші // Системи озброєння і військова техніка. – Харків: Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – 2016. – № 3(47). – С. 14–21.
8. Ammon D. Problems in road surface modelling // Vehicle System Dynamics. – 1991. – Vol. 20. – P. 28–41.
9. Andren P. Power spectral density approximations of longitudinal road profiles, Int. J. Vehicle Design, 2006. – Vol. 40, №. 1/2/3. – P. 2–14.
10. Zhang Y. Non-stationary Random Vibration Analysis of Vehicle with Fractional Damping / Y. Zhang, W. Chen, L. Chen //13 National Conference on Mechanisms and Machines (NaCoMM07), Bangalore, India. – 2007. December. 12–13. – P. 171–178
11. Freeman Tomas E. Evaluation of a laser road surface fessber: summary report / Tomas E. Fruman, Kenneb H. McGhee. – Charloffesville, Virginia, 1995. – P. 2–4.
12. Gonzalez Effect of road profile on heavy vehicles with air suspension, /Gonzalez O, Jauregui J, Lozano A // Int. J. Heavy Vehicle Systems, 2007. – Vol. 14, №. 1. – P. 98–110.
13. ISO 8606:1995 – Mechanical vibration – road surface profiles – reporting of measured data, 1995. – 29p.
14. J. Ferris Characterising road profiles as Markov chains, Int. J. Vehicle Design, 2004. – Vol. 36, №2/3. – P. 103–115.
15. J. Zhu Stochastic modeling of pavement roughness / Zhu J, Zhu W //28th Southeastern Symposium on System Theory, 1996. – P. 28–32. 11.
16. M. Borowiec, A.K. Sen, G. Litak, J. Hunicz, G. Koszaaka, A. Niewczas, Vibrations of a vehicle excited by real road profiles, Forsch. Ingenieurwes. 74 (2010) 99 – 109
17. Steinwolf A. Limitations on the use of Fourier transform approach to describe test course profiles, / Steinwolf A, Cannon W // Sound and Vibration, the noise and vibration control magazine, 2005. – Vol. 39. – № 2, Acoustical Publications Inc. – P. 12–17.
18. Sun L. Nonstationary Dynamic Pavement Loads Generated by Vehicles Traveling at Varying Speed / L. Sun, F. Luo //Journal of Transportation Engineering, 2007. – Vol. 133. – № 4. – P. 252–263.
19. Tyan F. Generation of Random Road Profiles /F.Tyan, Y. Hong, S. Tu // Journal of Advanced Engineering, 2009. – Vol. 4. – № 2. – P. 151–156.
20. Zhang L. A study on nonstationary random vibration of a vehicle in time and frequency domains / L. Zhang, C. Lee Y. Wang //International Journal of Automotive Technology, 2002. – Vol. 3. – № 3. – P 171–178.

Reference(transliterated)

1. Bohomolov V. O. Modeliuvannia dorozhnoi poverkhni dlia rozrakhunku dynamiky rukhu transportnykh zasobiv / V. O. Bohomolov, V. I. Klymenko, A. I. Shtlov ta in. // Avtomobilnyi transport, 2011. – Vyp. 29. – S. 37–42.

2. Burian M. V. Plavnist rukhu avtobusiv u vzaïmozv'iazku z kharakterystykamy pidvisky ta sydin [Elektronnyi resurs] : dys. ... kand. tekhn. nauk : spets. 05.22.02 : haluz znan 13 / Mykhailo Volodymyrovych Burian ; nauk. kerivnyk Krainyk L. V. ; Nats. un-t "Lvivska politekhnika". – Lviv, 2020. – 151 s. – Bibliohr.: s. 132-151. – ukr.
3. Govoruschenko N. Ya. Systemotekhnika transportu / N. Ya. Govoruschenko, A. N. Turenko. – Harkiv : HGADTU, 1998. – 255 p.
4. Dynamika rukhu kolisnykh traktoriv : monohrafiia / B. I. Kalchenko [ta in.] ; Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t". – Kharkiv : Miroshnychenko O. A., 2021. – 320 s. : il. – Rezhym dostupu: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/55593>
5. Kalyuzhnyi O. Ya. Modeliuvannia system peredachi syhnaliv v obchysliuvalnomu seredovyshchi MATLAB-Simulink : navch. posib. / O. Ya. Kalyuzhnyi. – Kiyiv : IVTs «Politehnika», 2004. – 136 p.
6. Kuzo I. V Simulation micro profile road in dynamics problems wheeled vehicles / I. V Kuzo, Yu. V. Zalutskyi, O. V. Zhytenko. Modeliuvannia mikroprofilu dorohy v zadachakh dynamiky kolisnykh mashyn Zhytenko. // Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Dynamika, mitsnist ta proektuvannia mashyn i prykladiv. - 2016. - № 838. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPDM_2016_838_27
7. Larin O. O. Matematychno modeliuvannia kolyvan spetsializovanoho transportnogo zasobu z dvorivnevoiu neliniinoiu systemoiu pidresoriuvannia pry pereizdi odynychnoi dorozhnoi nerivnosti / O. O. Larin, V. M. Bashtovyi, R. O. Kaidalov ta inshi // Systemy ozbroïennia i viiskova tekhnika. – Kharkiv: Kharkivskiy natsionalnyi universytet Povitrianykh Syl imeni Ivana Kozheduba . – 2016. – No 3(47). – S. 14 – 21.
8. Ammon D. Problems in road surface modelling // Vehicle System Dynamics. – 1991. – Vol. 20. – P. 28–41.
9. Andren P. Power spectral density approximations of longitudinal road profiles, Int. J. Vehicle Design, 2006. – Vol. 40, №. 1/2/3. – P. 2–14.
10. Zhang Y. Non-stationary Random Vibration Analysis of Vehicle with Fractional Damping / Y. Zhang, W. Chen, L. Chen //13 National Conference on Mechanisms and Machines (NaCoMM07), Bangalore, India. – 2007. December.12–13. – P. 171–178.
11. Freeman Tomas E. Evaluation of a laser road surface fesber: summary report / Tomas E. Fruman, Kenneb H. McGhee. – Charloffesville, Virqinia, 1995. – P. 2–4.
12. Gonzalez Effect of road profile on heavy vehicles with air suspension, /Gonzalez O, Jauregui J, Lozano A // Int. J. Heavy Vehicle Systems, 2007. – Vol. 14, №. 1. – P. 98–110.
13. ISO 8606:1995 – Mechanical vibration – road surface profiles – reporting of measured data, 1995. – 29p.
14. J. Ferris Characterising road profiles as Markov chains, Int. J. Vehicle Design, 2004. – Vol. 36, №2/3. – P. 103–115.
15. J. Zhu Stochastic modeling of pavement roughness / Zhu J, Zhu W //28th Southeastern Symposium on System Theory, 1996. – P. 28–32. 11.
16. M. Borowiec, A.K. Sen, G. Litak, J. Hunicz, G. Koszaaka, A. Niewczas, Vibrations of a vehicle excited by real road profiles, Forsch. Ingenieurwes. 74 (2010) 99 – 109
17. Steinwolf A. Limitations on the use of Fourier transform approach to describe test course profiles, / Steinwolf A, Cannon W // Sound and Vibration, the noise and vibration control magazine, 2005. – Vol. 39. – № 2, Acoustical Publications Inc. – P. 12–17.
18. Sun L. Nonstationary Dynamic Pavement Loads Generated by Vehicles Traveling at Varying Speed / L. Sun, F. Luo //Journal of Transportation Engineering, 2007. – Vol. 133. – № 4. – P. 252–263.
19. Tyan F. Generation of Random Road Profiles /F.Tyan, Y. Hong, S. Tu // Journal of Advanced Engineering, 2009. – Vol. 4. – № 2. – P. 151–156.
20. Zhang L. A study on nonstationary random vibration of a vehicle in time and frequency domains / L. Zhang, C. Lee Y. Wang //International Journal of Automotive Technology, 2002. – Vol. 3. – № 3. – P 171–178.

Надійшла (received) 25.03.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Мамонтов Анатолій Геннадійович (Mamontov Anatolii) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автомобіле- і тракторобудування; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5586-2113>; e-mail: monkhoktar@gmail.com.

Островерх Олександр Олегович (Ostroverkh Olexandr) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автомобіле- і тракторобудування; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8334-0286>; e-mail: ostrov.sasha@gmail.com.

Кожушко Андрій Павлович (Kozhushko Andrii) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автомобіле- та тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4725-5911>; e-mail: Andreykozhushko7@gmail.com.

Кривошапов Сергій Іванович (Kryvoshepov Serhii) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри технічної експлуатації і сервісу автомобілів ім. проф. Говорущенко М. Я., м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4605-6790>; e-mail: teas@khadi.kharkov.ua.