

І. В. Кузьо*, Ю. В. Залуцький*, О. В. Житенко**
Національний університет "Львівська політехніка",
*кафедра механіки та автоматизації машинобудування,
**кафедра транспортних технологій

МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОПРОФІЛЮ ДОРОГИ У ЗАДАЧАХ ДИНАМІКИ КОЛІСНИХ МАШИН

© Кузьо І. В., Залуцький Ю. В., Житенко О. В., 2016

Запропоновано математичні моделі та програмне забезпечення для моделювання мікропрофілю дороги різних типів. Отримані значення висоти нерівностей мікропрофілю використовуються як вхідний сигнал під час дослідження коливальних процесів у колісних машинах.

Ключові слова: мікропрофіль дороги, колісні машини, колювання, моделювання, програмне забезпечення.

For modeling various types of road microprofile offered by mathematical models and software. The values of roughness height are used as input in the study of vibrational processes in wheel machines.

Key words: road microprofile, wheel machines, vibrational processes, modeling software.

Постановка проблеми та аналіз відомих досліджень і публікацій. Для дослідження коливальних процесів у колісних машинах необхідно мати інформацію про характеристики як динамічної системи, так і про джерела зовнішніх збурень, тобто поверхні дороги. Відомо [1], що профіль дороги поділяється на три складові: макропрофіль, мікропрофіль та шорсткість.

Макропрофіль дороги складається з довгих плавних нерівностей (довжина хвилі 100 м і більше), і фактично не викликає колювань автомобіля у підвісці, але помітно впливає на динаміку машини, режим роботи двигуна та трансмісії. Мікропрофіль складається з нерівностей (довжина хвилі від 0,1 до 1,0 м) та викликає помітні колювання у підвісці. Шорсткість поверхні дороги з довжиною хвилі до 0,1 м згладжується шинами та не викликає відчутних колювань автомобіля, проте впливає на роботу шин [2]. Тому під час дослідження колювань підвіски колісної машини як збурення з боку дороги переважно використовується саме мікропрофіль дорожньої поверхні.

Історично склалося так, що дослідження та аналіз мікропрофілю дороги виконують у частотній області, використовуючи спектральну густину потужності [3]. Необхідно відмітити, що форма цього параметра не залежить від типу дорожнього покриття. Так, у [4] представлено 11 різних параметричних спектральних густин потужності, одна з яких стандартизована в ISO 8606 (табл. 1 – 3) [5]. Проте на реальній дорозі, як правило, існують певні нерегулярні нерівності різної величини (виступи, вибоїни тощо). Такі відхилення від норми запропоновано обчислювати середньоквадратичним відхиленням другої похідної від рівня дороги вздовж неї [6]. Іншим варіантом [7] пропонується використовувати вейвлет-перетворення, причому наступною пропозицією було розкласти профіль дороги окремо на дві частини: умовно позитивну (вибоїни) та негативну (яма) дії. Крім того, існує також статистичний тест, який застосовується для перевірки профілю дороги на стаціонарність [8].

У наукових працях представлені різні моделі мікропрофілю дороги, проте найпоширенішими є стаціонарні гауссівські моделі з заданими характеристиками частотної області [9], авторегресійні моделі [10], моделі на основі ланцюга Маркова [11] та різні трансформації гауссівських моделей [12].

Основний матеріал. Суть задачі моделювання випадкового мікропрофілю дороги полягає у використанні деякого формоутворювального фільтра, який повинен перетворювати сигнал булевого шуму у стаціонарний процес з наперед заданими параметрами автокореляційної функції.

Профіль дороги може бути представлений функцією спектральної густини, що характеризує розподіл потужності сигналу за часовим спектром. Для її визначення необхідно вимірювати мікропрофіль дороги по відношенню до базової площини. Випадкові дорожні мікропрофілі можуть бути представлені такими залежностями [5]:

$$\Phi(\Omega) = \Phi(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-w}, \text{ або } \Phi(n) = \Phi(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w}, \quad (1)$$

де $\Omega = \frac{2p}{L}$, $\Omega = 2pn$ – просторова кутова швидкість та просторова частота, відповідно, рад/м, цикл/м; L – довжина хвилі, м; $\Phi_0 = \Phi(\Omega_0)$, $\Phi_0 = \Phi(n_0)$ – значення спектральної густини потужності за значення просторової кутової швидкості $\Omega_0 = 0,1$ рад/м та просторової частоти за $n_0 = 0,1$ цикл/м; w – хвилястість поверхні, яка знаходиться у межах $1,75 \leq w \leq 2,25$, проте для більшості мікропрофілів має значення $w = 2$.

Варто відмітити, що до класу А та В належать нові шари асфальтного чи бетонного полотна; класу С відповідають старі шари проїзної частини, які не оновлюються; класу D та E відповідає дорога з шаром бруківки (табл. 1 – 3) [5].

Таблиця 1

Дорожні нерівності за класифікацією ISO 8606

Клас дороги	Ступінь нерівності $\Phi(n_0)$, $10^{-6} \text{ м}^2/(\text{цикл/м})$; де $n_0 = 0,1$ цикл/м		
	Нижній ліміт	Середнє значення	Верхній ліміт
А (дуже добра)	–	126	32
В (добра)	32	64	128
С (середня)	128	256	512
Д (погана)	512	1024	2048
Е (дуже погана)	2048	4096	8192

Таблиця 2

Дорожні нерівності за класифікацією ISO 8606

Клас дороги	Ступінь нерівності $\Phi(\Omega_0)$, 10^{-6} м^3 ; де $\Omega_0 = 1$ рад/м		
	Нижній ліміт	Середнє значення	Верхній ліміт
А (дуже добра)	–	1	2
В (добра)	2	4	8
С (середня)	8	16	32
Д (погана)	32	64	128
Е (дуже погана)	128	256	512

Таблиця 3

Стандартні відхилення дорожніх нерівностей за класифікацією ISO 8606

Клас дороги	s , 10^{-3} м	Ступінь нерівності $\Phi(\Omega_0)$, 10^{-6} м^3 ; $\Omega_0 = 1$ рад/м	a , рад/м
А (дуже добра)	2	1	0,127
В (добра)	4	4	0,127
С (середня)	8	16	0,127
Д (погана)	16	64	0,127
Е (дуже погана)	32	256	0,127

Як відомо, величина вхідного збурення з боку дороги залежить від швидкості руху V та дорожніх нерівностей як функції протяжності дороги I , яку можна записати так:

$$I = \frac{2p}{\Omega}. \quad (2)$$

Припускаючи, що на початку моделювання пройдений шлях та час відповідно становлять $s_0 = 0, t_0 = 0$, то вираз (2) можна подати у такому вигляді:

$$\Omega \cdot s = \frac{2p}{l} s = 2p \frac{V}{l} t = w \cdot t, \quad (3)$$

де $w = \Omega V$ – кутова швидкість у тимчасовій частотній області під час руху колісної машини з постійною швидкістю, рад/с; V – швидкість транспортного засобу, м/с.

Оскільки загальна площа функції спектральної густини потужності не змінюється зі швидкістю руху, то як вхідний сигнал цей параметр набуває такого вигляду:

$$\Psi(w) dw = \Phi(\Omega) d\Omega, \quad (4)$$

що, своєю чергою, дасть можливість отримати такі залежності:

$$\Psi(w) = \Phi(\Omega) \frac{1}{V}, \quad (5)$$

$$\Psi(w) = \Phi(\Omega) \Omega_0^2 \frac{V}{w^2}. \quad (6)$$

Це вказує на те, що спектральна густина потужності може бути отримана з інтегрування “білого шуму” (тобто випадковим пошуком), у такій тимчасовій області [13]:

$$\Psi(w) = \frac{2aVs^2}{w^2 + a^2V^2}, \quad (7)$$

де s – середньоквадратичне відхилення від нульового рівня (табл. 3), 10^{-3} м; a – величина, обернена до сталої часу, що залежить від типу дорожнього покриття, рад/м (табл. 3).

Спектральна густина потужності профілю дороги може бути представлена у розгорнутому вигляді такою залежністю [14]:

$$\Psi(w) = \frac{2aVs^2}{(aV + jw)(aV - jw)} = H(w) \Psi_w H^T(-w), \quad (8)$$

де $H(w) = \frac{1}{(aV + jw)}$ – амплітудно-частотна характеристика; $\Psi_w = 2aVs^2$ – спектральна густина білого шуму.

Отже, якщо у дослідженнях автомобіль рухатиметься з постійною швидкістю, то шляхом генерації білого шуму зручно будувати випадкову функцію, яка описує висоти нерівностей $z_R(t)$ в часі [15]:

$$\frac{d}{dt} z_R(t) = -aV z_R(t) + w(t), \quad (9)$$

де $w(t)$ – дискретний білий шум з відповідною спектральною густиною Y_w .

Залежність (9) є вхідним сигналом у вигляді мікропрофілю дороги, який подається на вході динамічної системи під час її моделювання та дослідження. Залежність (9) зручно реалізувати засобами Matlab/Simulink у такому вигляді (рис. 1):

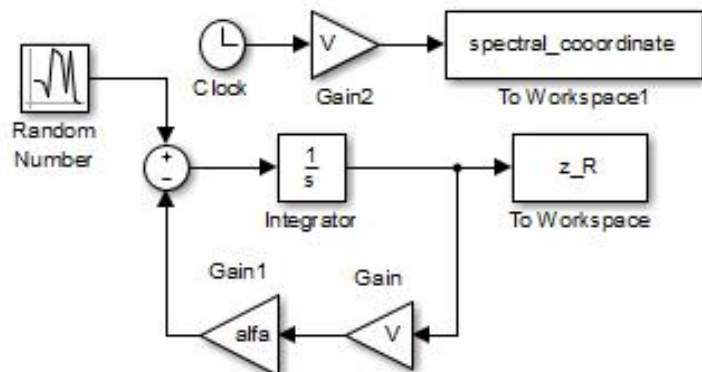


Рис. 1. Структурна схема реалізації мікропрофілю дороги як стаціонарного випадкового процесу засобами Matlab/Simulink

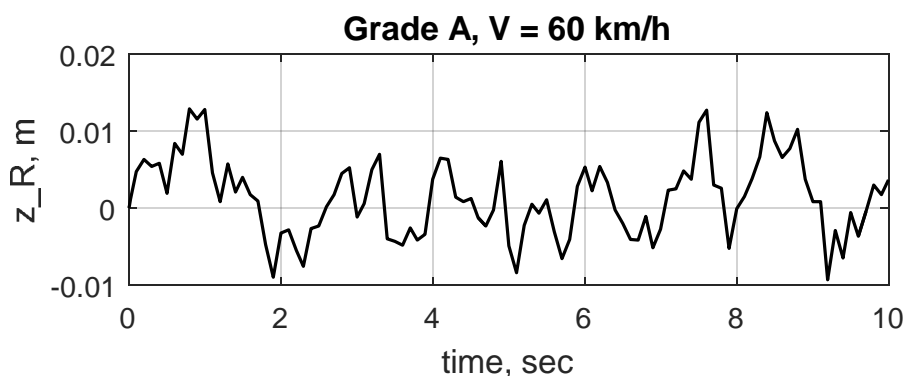


Рис. 2. Мікропрофіль дороги типу А згідно з ISO 8606 (табл. 1 – 3)
як стаціонарний випадковий процес

За необхідності проводити дослідження коливальних процесів під час руху транспортного засобу зі змінною швидкістю доцільно також розглянути нестационарний випадковий процес [16–17]. Якщо транспортний засіб рухається з постійною швидкістю V , то залежність між частотою f часу і швидкістю можна подати як

$$f = V \cdot n, \quad (10)$$

де n – просторова частота, цикл/м.

Тоді спектральна густина потужності маленького зміщення, згідно з існуючою методикою [18], набуде такого вигляду:

$$\Phi(f) = \frac{\Phi(n_0) \cdot n_0^2 \cdot V}{f^2}. \quad (11)$$

За методикою [18] дорожня нерівність у частотній області за значення кутової швидкості у цій частотній області $w = \Omega V$ може бути описана так:

$$\Phi(w) = \frac{\Phi(n_0)}{V} = \frac{\Phi(n_0) \cdot V}{w^2}. \quad (12)$$

Проте тут виникатимуть труднощі під час моделювання, оскільки за $w=0$ отримаємо $\Phi(w) = \infty$. Тому доцільно цей вираз подати як

$$\Phi(w) = \frac{\Phi(n_0) \cdot V}{w^2 + w_0^2}, \quad (13)$$

де $w_0^2 = 2p f_0 = 2p n_0$ – найнижче відсічення кутової частоти.

Вираз (13) на основі теорії випадкових коливань можна подати у такому вигляді:

$$\Phi(w) = |H(w)|^2 S_w(w), \quad (14)$$

де $|H(w)|$ – модуль амплітудно-частотної характеристики (15), тобто передавальна функція; $S_w(w)$ – спектральна густина потужності білого шуму, $S_w(w) = 1$.

Із залежностей (13) та (14) передавальну функцію $H(w)$ можна подати у такому вигляді:

$$H(w) = \frac{\sqrt{\Phi(\Omega_0) \cdot V}}{w_0 + jw}. \quad (15)$$

Відповідно до перетворень Лапласа, наведене вище рівняння (15) може бути записане у такому вигляді:

$$H(s) = \frac{\sqrt{\Phi(\Omega_0) \cdot V}}{w_0 + s}, \quad (16)$$

який можна розглядати як передавальну функцію від сигналу білого шуму до мікропрофілю дороги. Враховуючи залежність (16), функцію мікропрофілю дороги за методикою [18] можна подати так:

$$\frac{d}{dt} z_R(t) + w_0 z_R(t) = \sqrt{\Phi(\Omega_0) \cdot V} \cdot w(t), \quad (17)$$

де $z_R(t)$ – мікропрофіль дороги, м; $w(t)$ – сигнал білого шуму зі спектральною густиною потужності $S_w(w) = 1$.

Оскільки найнижче відсічення кутової частоти прийнято $w_0 = 2p f_0 = 2p n_0$, то функцію мікропрофілю дороги $z_R(t)$ зручно подати у такому вигляді:

$$\frac{d}{dt} z_R(t) + 2pVn_0 z_R(t) = \sqrt{G_q(\Omega_0)V} \cdot w(t). \quad (18)$$

Залежність (18) є вхідним сигналом мікропрофілю дороги, який зручно реалізовувати засобами Matlab/Simulink (рис. 3).

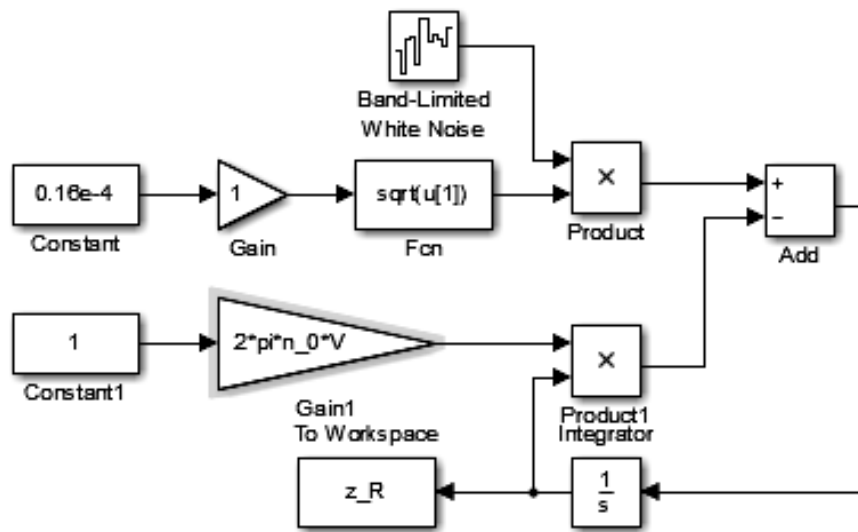


Рис. 3. Структурна схема реалізації мікропрофілю дороги як нестационарного випадкового процесу засобами Matlab/Simulink

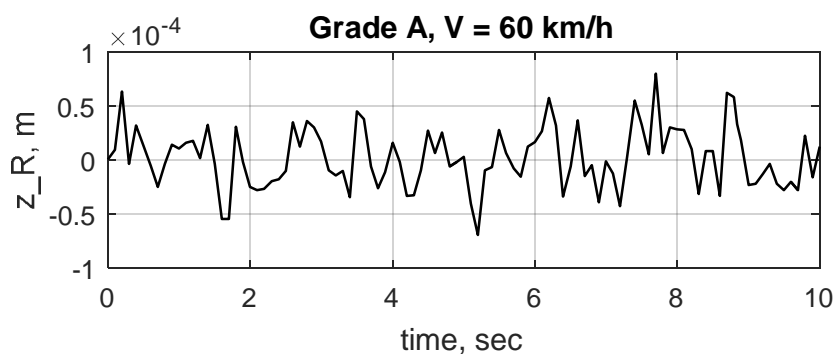


Рис. 4. Мікропрофіль дороги типу А згідно з ISO 8606 як стаціонарний випадковий процес

Статистичне подання за допомогою спектральної густини ординат мікропрофілю доцільне, коли йдеться про неперервні нерівності випадкових розмірів. За детермінованої оцінки, тобто у разі хвилеподібної чи одиничної нерівності мікропрофіль доцільно розглядати як окремі збурення, що характеризуються довжиною, формою та послідовністю. Прикладами може бути розбита дорога чи бруківка [19].

Колісна машина під час руху дорогами будь-якого типу ніколи не може бути застрахована від переїзду якихось одиничних нерівностей, тому необхідно також розглядати цей вид збурень під час дослідження коливальних процесів.

Характерні профілі цих збурень бувають у вигляді хвилі, трикутника, циліндра та вибоїни (рис. 5).

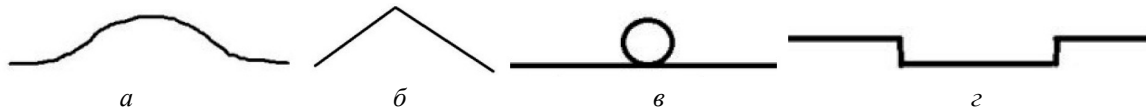


Рис. 5. Характерні профілі одиничних збурень: а – хвиля; б – трикутник; в – циліндр; г – вибоїна

Поодинокі збурення з боку дороги типу “хвиля” характерне для більшості доріг з удосконаленим покриттям, на якому спостерігається постійний інтенсивний рух. Збурення типу “трикутник” характерне для розбитих доріг з низькою інтенсивністю руху. Перешкода типу “циліндр” – це або лісові дороги, або дороги, вкриті бруківкою. Перешкода типу “вибоїна” – це переважно розбита асфальтна чи цементно-бетонна дорога.

Для цього типу збурення застосовуються такі параметри: період повторення нерівності $a = (0,5 \dots 4)L$, де L – колісна база машини, м; амплітуда $A = 0,05 \dots 0,15$ м.

Наприклад: наведено одиничний імпульс типу “вибоїна” (рис. 5, г), який зручно задавати такими залежностями [20]:

$$\begin{cases} q = 0, \text{ при } t \leq t_1, t \geq t_2 \\ q = A, \text{ при } t_1 \leq t \leq t_2 \end{cases}, \quad (20)$$

де $t_1 - t_2$ – час проходження нерівності, с.

Залежність (20) є вхідним сигналом з боку дороги, який зручно реалізовувати засобами Matlab/Simulink (рис. 6, 7).

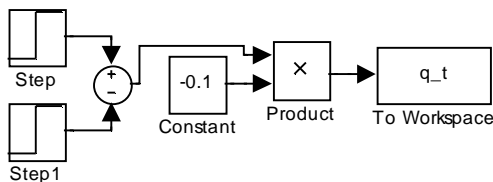


Рис. 6. Структурна схема одиничної нерівності дороги типу “вибоїна” засобами Matlab/Simulink

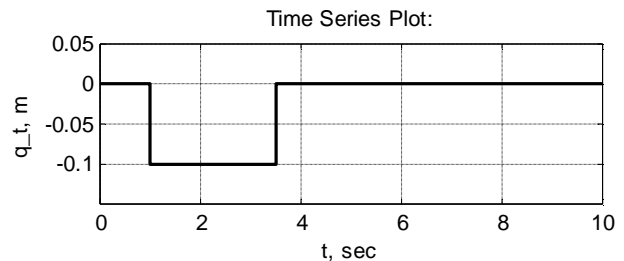


Рис. 7. Графічне подання одиничної нерівності дороги типу “вибоїна”

Висновки. Представлено математичні моделі мікропрофілю дороги та їх реалізації у системі Matlab/Simulink для трьох різних випадків: стаціонарного випадкового процесу, нестационарного випадкового процесу та одиничної нерівності. Отримані реалізації мікропрофілю дороги як вхідного сигналу дають змогу проводити подальші дослідження динаміки руху колісних машин.

1. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель // под общ. ред. А. А. Хачатурова. – М.: Машиностроение, 1976. – 534 с. 2. Богомолов В. О. Моделирование дорожной поверхности для расчёта динамики руху транспортних засобів / В. О. Богомолов, В. І. Клименко, А. І. Штлов та ін. // Автомобільный транспорт, 2011. – Вып. 29. – С. 37–42. 3. Ammon D. Problems in road surface modelling // Vehicle System Dynamics. – 1991. – Vol. 20. – P. 28–41. 4. Andren P. Power spectral density approximations of longitudinal road profiles, Int. J. Vehicle Design, 2006. – Vol. 40, №. 1/2/3. – P. 2–14. 5. ISO 8606:1995 – Mechanical vibration – road surface profiles – reporting of measured data, 1995. – 29p. 6. Bruscella B. Classification of road profiles, J. Transportation

Engineering, 2000. – Vol. 126. – №. 1. – P. 41–45. 7. Steinwolf A. *On the need for bump event correction in vibration test profiles representing road excitations in automobiles* /Steinwolf A., Giacomini J., Staszewski W.// *J. Automobile Engineering, Proc. of the institution of mechanical engineers*, 2002. – Part D, Vol. 216. – P. 279–295. 8. Chaika M. *Some statistical tests in the study of terrain modelling* /Chaika M, Gorsich D // *Int. J. Vehicle Design*, 2004. – Vol. 36, №. 2/3. – P. 132–148. 9. 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. 10. J. Zhu *Stochastic modeling of pavement roughness* / Zhu J, Zhu W // *28th Southeastern Symposium on System Theory*, 1996. – P. 28–32. 11. J. Ferris *Characterising road profiles as Markov chains*, *Int. J. Vehicle Design*, 2004. – Vol. 36, № 2/3. – P. 103–115. 12. Steinwolf A. *Limitations on the use of Fourier transform approach to describe test course profiles*, / Steinwolf A, Connon W // *Sound and Vibration, the noise and vibration control magazine*, 2005. – Vol. 39. – № 2, Acoustical Publications Inc. – P. 12–17. 13. A. Giua *Design of a predictive semiactive suspension system* / A. Giua, M. Melas, C. Seatzu // *Vehicle System Dynamics*, 2004. – Vol. 41. – № 4. – P. 277–300. 14. Tyan F. *Generation of Random Road Profiles* /F.Tyan, Y. Hong, S. Tu // *Journal of Advanced Engineering*, 2009. – Vol. 4. – № 2. – P. 151–156. 15. Sun L. *Spectral analysis and parametric study of stochastic pavement loads* /L. Sun, T. Kennedy // *Journal of Engineering Mechanics*, 2002. – Vol. 128. – №. 3. – P. 318–327. 16. 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. 17. 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. 18. 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. 19. Беляков В. В. *Подвижность специальных транспортных средств по дорогам типа “stone-road”* / В. В. Беляков, У. Ш. Вахидов, Д. А. Галкин // *Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева*. – 2012. – №1 – С. 143–151. 20. Сергиенко А. Н. *Методика описания неровностей профиля дороги при моделировании подвески автомобиля с рекуператором энергии колебаний* / А. Н. Сергиенко, Н. Г. Медведев, С. Н. Беляев // *Вісник НТУ “ХПІ”*. – 2013. – №37(1010) – С. 185–192.