

УДК 629.3.027

МОДЕЛЮВАННЯ ДОРОЖНЬОЇ ПОВЕРХНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ДИНАМІКИ РУХУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

**В.О. Богомолов, професор, д.т.н., В.І. Клименко, професор, к.т.н.,
А.І. Шилов, доцент, к.т.н., Р.В. Алексеєв, аспірант, ХНАДУ**

Анотація. Розглянуто методи вимірювання висоти мікропрофілю дорожньої поверхні та методи синтезу мікропрофілю дороги для математичного моделювання.

Ключові слова: мікропрофіль, макропрофіль, рельєф дороги, шорсткість,

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОРОЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

**В.А. Богомолов, профессор, д.т.н., В.И. Клименко, профессор, к.т.н.,
А.И. Шилов, доцент, к.т.н., Р.В. Алексеев, аспирант, ХНАДУ**

Аннотация. Рассмотрены методы измерения высоты микропрофиля дорожной поверхности и методы синтеза микропрофиля дороги для математического моделирования.

Ключевые слова: микропрофиль, макропрофиль, рельеф дороги, шероховатость,

MODELING OF ROAD SURFACE FOR VEHICLES DYNAMICS CALCULATION

**V. Bogomolov, Professor, Doctor of Technical Science, V. Klimenko Professor,
Candidate of Technical Science, A. Shilov, Associate Professor, Candidate of Technical
Science, R. Alekseev, postgraduate, KhNAHU**

Abstract. The methods for measuring the height of micro profile road surface and the methods of micro profile road synthesis for mathematical modelling are considered.

Key words: micro-lined, makroprofile, road relief roughness.

Вступ

Вибір параметрів системи підресорювання для транспортних засобів, що працюють у різних дорожніх умовах, має дуже важливе значення для подальшої їх експлуатації. Складність вибору параметрів цієї системи підресорювання пояснюється тим, що сили, що передаються на раму машини, залежать не тільки від конструктивних параметрів самої машини, маси та розподілу за довжиною і шириною; жорсткості пружних елементів і шин коліс; числа осей та їх розташування щодо центру мас, але і від інших чинників: нерівностей дороги, жорсткості дорожнього покриття (грунту), навантаженості машини, швидкості її руху, рівномірності подачі палива тощо.

Аналіз публікацій

На сьогодні значного розвитку набула статистична динаміка – одна з галузей теорії вірогідності, за допомогою якої стали можливими розрахунки динамічних систем з випадковими параметрами навантаження.

Статистична динаміка набула розвитку у працях А.М. Колмогорова, А.Я. Хінчина, А.М. Яглома, В.С. Пугачова та ін. і стала широко вживатися в теорії локації, радіотехніці, авіації, теорії автоматичного регулювання і т. ін. За допомогою статистичної динаміки можна визначити статистичні характеристики процесів, що протікають у складних динамічних системах, за статистичними характеристиками дії [1].

Така теорія дозволяє визначити: вплив коливань на динамічні навантаження коліс та їх підшипники; величини цих навантажень, що іноді у десятки разів перевищують вагу самої машини; частоту появи таких навантажень; частоту появи відривів коліс від дороги. Тільки на основі статистичної динаміки можна точно розрахувати на міцність пружні елементи, напівосі, шини та інші деталі, а також визначити їх довговічність.

Також треба відзначити, що розвиток технічного, програмного та математичного забезпечення систем автоматизованого проектування дозволяє провести розрахунок та аналіз руху транспортного засобу, для чого важливо використовувати окремі реалізації випадкового профілю дороги, статичні характеристики яких відповідають реальним.

Мета та постановка задачі

Метою дослідження є вибір методу отримання випадкових реалізацій профілю дорожньої поверхні, статичні характеристики яких відповідають реальним та які можна використовувати при розрахунках динаміки руху транспортних засобів.

Задачами дослідження є аналіз існуючих методів отримання профілю дороги як випадкової величини та розробка генератора випадкового профілю у середовищі Simulink програмного комплексу Matlab.

Методи запису мікропрофілю дорожньої поверхні

Найпростішим способом отримання профілю дороги для використання у розрахунках є безпосереднє його вимірювання та подальша обробка. Методи запису мікропрофілю діляться на безпосередні і непрямі. Безпосереднє вимірювання мікропрофілю дорожньої поверхні проводять за допомогою нівеліра з кроком 0,1–0,5 м (рис. 1). Такий запис дає найточнішу інформацію про довгі і дуже короткі нерівності, проте відрізняється надзвичайно великою трудомісткістю. Низька продуктивність безпосередніх методів змушує вимірювати лише короткі ділянки доріг завдовжки 100–200 м. При цьому через велику похибку кінцевої вибірки майже повністю втрачається інформація про низькі частоти мікропрофілю. Крім того, природне прагнення зменшити трудомісткість робіт часто при-

водить до вибору дуже великого кроку запису. При цьому повністю втрачається інформація про короткі нерівності [2].

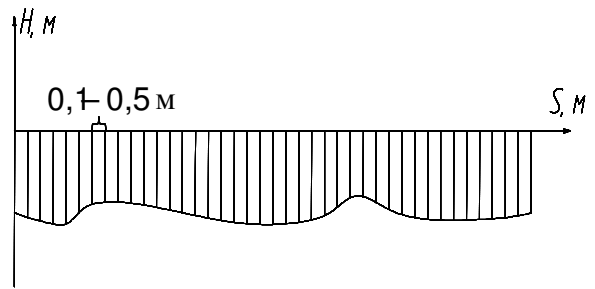


Рис. 1. Безпосередній метод запису мікропрофілю

Непрямий метод запису мікропрофілю дорожньої поверхні реалізується за допомогою використання п'ятого колеса, прилаштованого до автомобіля. Проте цей спосіб має два істотні недоліки: не враховуються прогинання (відриви) шини і на низьких частотах записуються дуже слабкі сигнали, що неминуче призводить до великих похибок при їх відтворенні [2].

У наш час для більш точного запису мікропрофілю дороги використовують лазерні системи. Наприклад, система Laser RST (рис. 2) являє собою балку, на якій закріплено два бокси, що містять сенсори, лазерні камери й акселерометри, також передавач числа обертів колеса; цифровий перетворювач і портативний персональний комп'ютер.

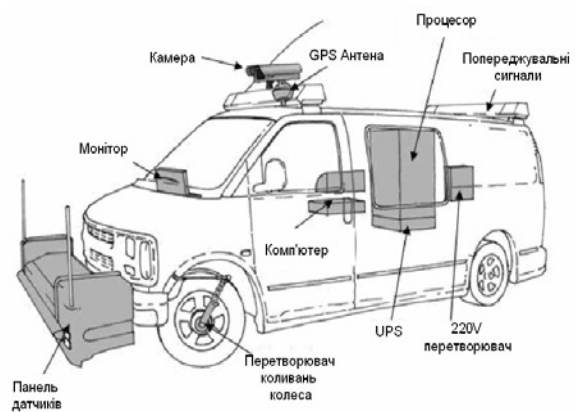


Рис. 2. Дорожня лабораторія Laser RST

Відстань між сенсорними боксами встановлюється залежно від відстані між коліями в діапазоні від 0,8 до 1,8 метрів. Балка кріпиться на буксировочний гак будь-якого автомобіля, у тому числі й легкового. У сенсорних

боксах змонтовані лазерні оптокатори, що передають інформацію про відстань до поверхні дороги. Оптокатор випромінює промінь інфрачервоного світла у вигляді вузького пучка, що утворює на поверхні відбиток, відстань до якого фіксується. Перед тим, як відцифрувати і лінеаризувати сигнал, спеціальні електронні схеми обробляють його для адаптації до різних умов висвітлення й відбиття. Вихідний сигнал оптокаторів являє собою високошвидкісну послідовність, що описує поздовжню лінію, утворену плямою світла на дорозі. Два високоточних серво-акселерометри змонтовані над оптокаторами в сенсорних боксах, які звичайно розташовані над правою й лівою коліями, і використовуються для визначення вертикальних прискорень, які діють на оптокатори. Ця інформація також необхідна для побудови поздовжнього профілю поверхні (рис. 2) [4].

Отриманий за допомогою цих методів рельєф дороги можна приблизно представити як сукупність паралельних перетинів, достатньо близько розташованих один від одного. Профіль дороги – перетин рельєфу у напрямі руху транспортного засобу. Перетин поверхні конкретної ділянки дороги є реалізацією профілю, а сукупність таких реалізацій є профілем дороги як випадкова величина. Останній залежить від вибору перетину, тому його проводять звичайно по колії руху. Рельєф і профіль дороги приймають функціями відстані S (шляху). Профіль дороги поділяється на три складові – макропрофіль, мікропрофіль і шорсткості, які зумовлені різною їх дією на автомобіль. Макропрофіль, що складається лише з довгих плавних нерівностей (довжина хвилі – 100 м і більше), практично не викликає коливань автомобіля на підвісці, але помітно впливає на динаміку автомобіля, режим роботи двигуна і трансмісії. Мікропрофіль складається з нерівностей (довжина хвилі – від 10 см до 100 м), які викликають помітні коливання автомобіля на підвісці; він не містить тривалих спусків і підйомів, що змінюють режим роботи двигуна. Шорсткість (довжина хвилі – менше 10 см) згладжуються шинами і не викликають відчутних коливань автомобіля, але впливають на роботу шин (зчеплення, знос і т. ін.) [2].

При дослідженні систем підресорювання транспортних засобів в якості збурюючого впливу звичайно використовується мікро-

профіль дорожньої поверхні. Для того щоб виконати перехід від профілю дороги до мікропрофілю, необхідно позбутися нерівностей, які виникають із занадто низькою частотою (рис. 3) та із занадто високою (рис. 4), тобто виконати частотну фільтрацію нерівностей. Для цього використовують спеціальні частотні фільтри.

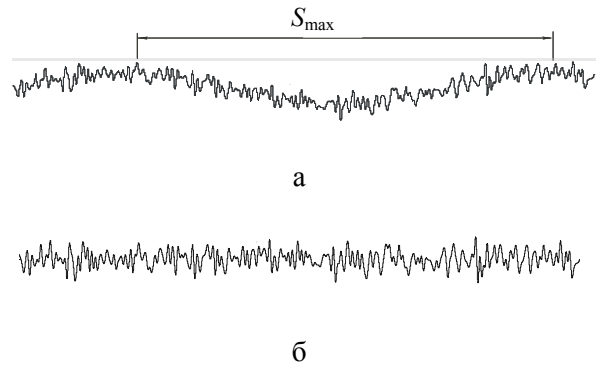


Рис. 3. Відокремлення нерівностей низької частоти: а – до фільтрації; б – після фільтрації

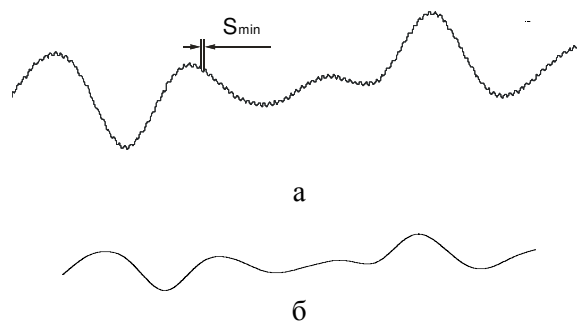


Рис. 4. Відокремлення нерівностей високої частоти: а – до фільтрації; б – після фільтрації

Іншим способом отримання профілю дороги є генератори випадкових чисел. Доведено, що розподілення нерівностей підлягає нормальному закону розподілу випадкових величин [2, 3]. Рельєф представляють у вигляді однорідного ізотропного нормального двовимірного випадкового поля або його найпростіших перетворювань, а профіль – у вигляді регулярного стаціонарного випадкового процесу.

Запишемо аналітичні вирази, необхідні для реалізації випадкової функції мікропрофілю дороги.

Випадкову функцію профілю будемо вважати стаціонарною, центрованою з нормальним (гаусовським) розподілом вертикальних ординат z нерівностей по колії, щільність якої визначається виразом [4]

$$\phi_x(z) = \left(1/\sqrt{2\pi \cdot D_z}\right) \cdot e^{-z^2/2D_z}, \quad (1)$$

де D_z – дисперсія випадкової величини z .

У той же час відомо, що щільність розподілу висот нерівностей профілю доріг є розподілом Релея [4]

$$\phi_x(h) = (h/D_h) \cdot e^{-h^2/2D_h}, \quad h \geq 0 \quad (2)$$

де D_h – дисперсія випадкової величини –

$$D_h = 4D_z / k^2, \quad (3)$$

де k – відношення математичних очікувань числа екстремумів до математичного очікування числа нулів випадкової функції, що припадають на одиницю шляху.

Маючи реалізацію випадкової функції $z(x)$, можна підрахувати загальне число нулів n_0 і екстремумів n_e ; потім визначити середнє значення числа нулів \bar{n}_0 і екстремумів \bar{n}_e

$$\bar{n}_0 \approx n_0 / S_0, \quad \bar{n}_e \approx n_e / S_0, \quad (4)$$

де S_0 – довжина реалізації $z(x)$.

Далі слід знайти значення k за такими формулами

$$k = n_e / n_0 \approx \bar{n}_e / \bar{n}_0. \quad (5)$$

Таким чином, за довжиною ділянки (як правило, 1 км) для обраних умов реалізації випадкової функції $z(x)$, використовуючи властивість ергодичності, можна одержати дисперсію D_h і, отже, функцію розподілу висоти нерівностей

$$\phi_x(h) = 1 - e^{-h^2/2D_h}. \quad (6)$$

Також за відомою функцією розподілу висот нерівностей, з огляду на те, що для випадкових функцій, близьких за формою до гармонійних функцій, $k \approx 1$, можна одержати D_z , а потім і кореляційну функцію верти-

кальних координат нерівностей, достатню для повного опису нерівностей дороги.

Залежність між функцією розподілу довжин нерівностей $\Phi_x(A)$ і кореляційною функцією вертикальних ординат нерівностей $R_z(X)$ реалізації випадкової функції $z(x)$ визначається в такий спосіб [3]

$$r_z(X) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_x(\omega) \cdot e^{i\omega X} d\omega; \quad (7)$$

$$\phi_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} r_z(X) e^{-i\omega X} dX; \quad (8)$$

де $r_z(X)$ – нормована кореляційна функція

$$r_z(X) = R_z(X) / D_z; \quad (9)$$

$\phi_x(\omega)$ – щільність розподілу просторової частоти ω .

$$\phi_x(\omega) = d\Phi_x(\omega) / d\omega. \quad (10)$$

Також можна встановити зв'язок між спектральною щільністю $S_z(\omega)$ і щільністю розподілу просторової частоти $\phi_x(\omega)$ [4]

$$2\pi\phi_x(\omega) = S_z(\omega) / D_z. \quad (11)$$

Вважаючи, що $\omega = 2\pi / A$, одержимо шукану щільність розподілу ймовірностей $\phi_x(A)$ довжин нерівностей по шляху, а з неї – функцію розподілу нерівностей $\Phi_x(A)$ [3]. За даною методикою було сгенеровано, за даними табл. 1, різні ділянки доріг (рис. 5–7).

Таблиця 1 Характеристики доріг

Тип дороги	Висота нерівностей Н, м		Відстань між нерівностями, м
	математичне очікування	σ_{\max}	
Бетонні плити	0,006–0,012	0,02	4–5
Асфальт	0,01–0,014	0,03	3,5–4
Бруківка	0,02–0,035	0,07	2–2,5
Ґрунтова	0,02–0,025	0,05	3–3,5

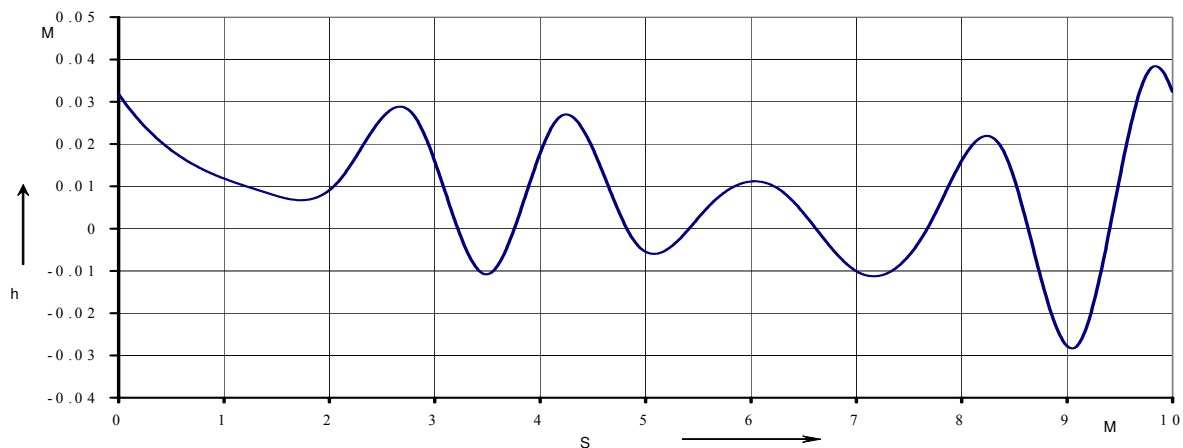


Рис. 5. Результати моделювання мікропрофілю асфальтної дороги

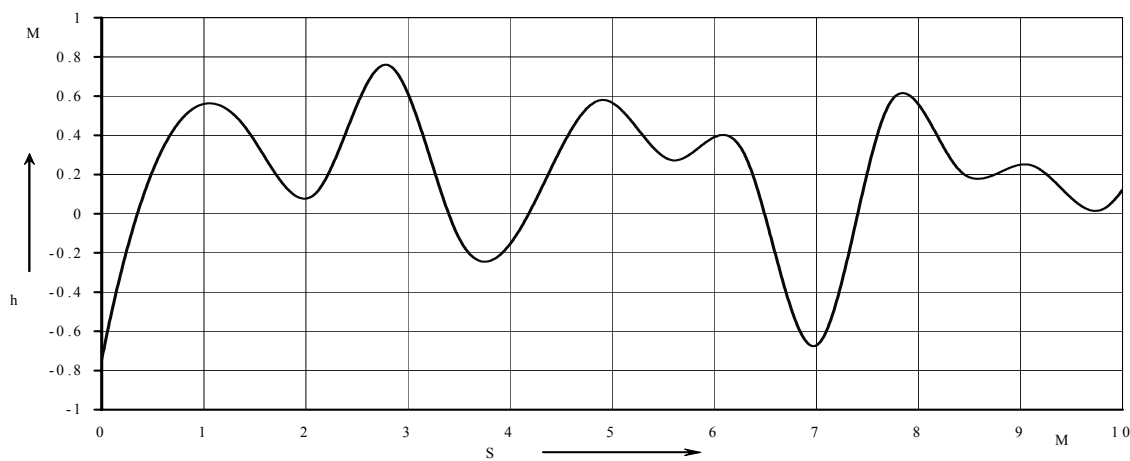


Рис. 6. Результати моделювання мікропрофілю ґрунтової дороги

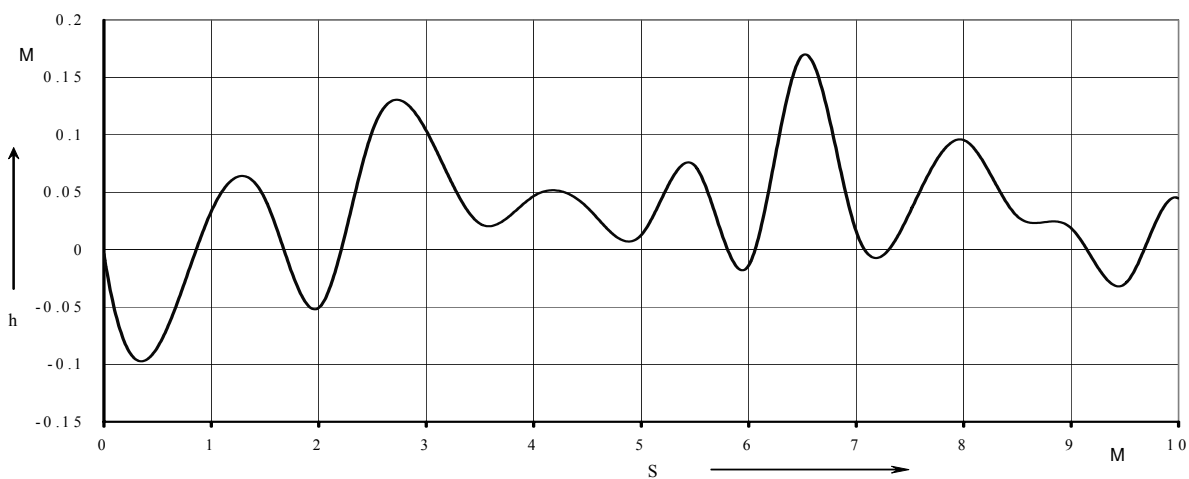


Рис. 7. Результати моделювання мікропрофілю бруківки

Висновки

В результаті аналізу існуючих методів отримання профілю дороги як випадкової величини було розроблено методику отримання випадкових реалізацій профілю дорожньої поверхні. Розроблено генератори випадкового профілю у середовищі Simulink програмного комплексу Matlab, статичні характеристики яких відповідають реальним та які можна використовувати при розрахунках динаміки руху транспортних засобів.

Література

1. Хачатуров А.А. Динамика системы «дорога – шина – автомобиль – водитель» / А.А. Хачатуров, В.Л. Афанасьев, В.С. Васильев и др. ; под ред. А.А. Хачатурова. – М. : Машиностроение, 1976. – 535 с.
2. Силаев А.А. Спектральная теория поддресоривания транспортных машин / А.А. Силаев. – М. : Машиностроение, 1972. – 192 с.
3. Сарач Е.Б. Методы преобразования статистических данных микропрофиля пути / Е.Б. Сарач // Журнал ассоциации автомобильных инженеров. – 2010. – №2 (61). – С. 19.
4. Freeman Tomas E. Evaluation of a laser road surface fester: summary report / Tomas E. Fruman, Kenneb H. McGhee. – Charloffesville, Virginia, 1995. – P. 2–4.

Рецензент: М.А. Подригало, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 19 травня 2011 р.
