

УДК 625.032.432

РИБКІН В.В., д.т.н., професор (ДНУЗТ);
ПАНЧЕНКО П.В., аспірант (ДНУЗТ).

Удосконалення методики моделювання просторових коливань колії та рухомого складу

Найважливішою задачею удосконалення залізничного транспорту України є підвищення швидкостей руху поїздів [1]. Постійний їх ріст, підготовка напрямків, для руху з високими швидкостями під час ЕВРО – 2012 визвали увагу до забезпечення плавності руху залізничних екіпажей, комфортабельності їзди пасажирів, а також забезпеченню безпеки руху. Оскільки впровадження прискореного руху в Україні відбувається вперше, то це призвело до вивчення процесів динаміки рухомого складу та колії, а це не можливо без експериментальних та теоретичних досліджень. Теоретичні дослідження базуються на багатьох методиках [2-9]. Але в усіх них є недоліки, які не дають можливості більш точнішого дослідження процесів взаємодії колії та рухомого складу при швидкостях понад 140 км/год, а саме:

- вважається, що в рухомому складі виникають лише малі коливання, тому ви-

користовується принцип геометричної лінійності, тобто $\sin(\varphi) = \varphi$; $\cos(\varphi) = 1$.

- не має можливості моделювання дисипативних та пружних характеристики силової взаємодії тіл, інерційних характеристик тіл, як змінних у часі та змінних в залежності від місця розташування у колії;

- не має можливості моделювати колію у фактичному стані за натурними обмірами.

Всі перелічені вище недоліки приводять до удосконалення методики моделювання рейкових екіпажей. Методика моделювання складається з основних наступних частин.

Математичне моделювання системи диференціальних рівнянь динаміки тіла

Функція, яка описує усі сили та моменти сил, що діють на тіло за допомогою диференціальних рівнянь має наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 z(t)}{dt^2} \\ \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \\ \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \\ \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} \\ \frac{d^2 \psi(t)}{dt^2} \\ \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sum_{i=1}^m F_{iz}}{m}; \\ \frac{\sum_{i=1}^m F_{iy}}{m}; \\ \frac{\sum_{i=1}^m F_{ix}}{m}; \\ \frac{\sum_{i=1}^m \left(-F_{iz} \cdot (L_x + L_z \cdot \sin(\varphi(t)) + L_y \cdot \sin(\psi(t))) + F_{ix} \cdot (L_z - L_x \cdot \sin(\varphi(t)) - L_y \cdot \sin(\theta(t))) + \sum_{i=1}^{my} M_{iy} \right)}{J_y}; \\ \frac{\sum_{i=1}^m \left(F_{iy} \cdot (L_x + L_y \cdot \sin(\psi(t)) + L_z \cdot \sin(\varphi(t))) - F_{ix} \cdot (L_y + L_x \cdot \sin(\psi(t)) - L_z \cdot \sin(\theta(t))) + \sum_{i=1}^{mz} M_{iz} \right)}{J_z}; \\ \frac{\sum_{i=1}^m \left(F_{iz} \cdot (L_y - L_z \cdot \sin(\theta(t)) + L_x \cdot \sin(\psi(t))) - F_{iy} \cdot (L_z - L_y \cdot \sin(\theta(t)) - L_x \cdot \sin(\varphi(t))) + \sum_{i=1}^{mx} M_{ix} \right)}{J_x} \end{array} \right. \quad (1)$$

де: f_z, f_y, f_x - кількість сил, що діють на тіло у площині z, y, x , шт;

$f_\varphi, f_\psi, f_\theta$ - кількість сил, що діють на тіло відносно вісей $0_y, 0_z, 0_x$, шт;

m_y, m_z, m_x - кількість моментів сил, що діють на тіло відносно вісей $0_y, 0_z, 0_x$, шт;

F_z, F_y, F_x - сили, що діють на тіло у площині z, y, x , кН;

M_y, M_z, M_x - моменти сил, що діють на тіло відносно вісей $0_y, 0_z, 0_x$, кН·м;

L_x, L_y, L_z - координати сил (відносно центра тяжіння тіла), що діють на тіло у площині z, y, x , м;

m - маса тіла, т;

J_x, J_y, J_z - моменти інерції тіла відносно вісей $0_y, 0_z, 0_x$, т·м²;

$z(t), y(t), x(t)$ - лінійні координати переміщення центра тяжіння тіла у часі, м;

$\varphi(t), \psi(t), \theta(t)$ - кутові координати переміщення центра тяжіння тіла у часі, м.

Математичне моделювання переміщення будь-яких точок на тілі з урахуванням геометричної не лінійності

Використовуючи принцип описання взаємодії тіл [4] можна написати наступні рівняння.

Загальна функція переміщень будь-яких точок на тілі в часі має наступний вигляд:

$$\begin{Bmatrix} X(t) \\ Y(t) \\ Z(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Z \cdot \sin(\varphi(t)) - Y \cdot \sin(\theta(t)) + x(t) \\ X \cdot \sin(\theta(t)) - Z \cdot \sin(\psi(t)) + y(t) \\ -X \cdot \sin(\varphi(t)) + Y \cdot \sin(\psi(t)) + z(t) \end{Bmatrix}; \quad (2)$$

Загальна функція швидкості переміщень будь-яких точок на тілі в часі має наступний вигляд:

$$\begin{Bmatrix} \frac{dX(t)}{dt} \\ \frac{dY(t)}{dt} \\ \frac{dZ(t)}{dt} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Z \cdot \cos(\varphi(t)) \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} - Y \cdot \cos(\theta(t)) \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{dx(t)}{dt} \\ X \cdot \cos(\theta(t)) \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} - Z \cdot \cos(\psi(t)) \cdot \frac{d\psi(t)}{dt} + \frac{dy(t)}{dt} \\ -X \cdot \cos(\varphi(t)) \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} + Y \cdot \cos(\psi(t)) \cdot \frac{d\psi(t)}{dt} + \frac{dz(t)}{dt} \end{Bmatrix}; \quad (3)$$

де: $[X, Y, Z]$ - координати точки на тілі по вісі $0_x, 0_y, 0_z$, м;

$[x(t), y(t), z(t)]$ - переміщення центра тяжіння тіла в часі по вісям x, y, z , м;

$\left[\frac{dx(t)}{dt}, \frac{dy(t)}{dt}, \frac{dz(t)}{dt} \right]$ - швидкість переміщення центра тяжіння тіла в часі по вісям x, y, z , м/с;

$[\varphi(t), \theta(t), \psi(t)]$ - кутові переміщення тіла в часі відносно вісей y, x, z , рад;

$\left[\frac{d\varphi(t)}{dt}, \frac{d\theta(t)}{dt}, \frac{d\psi(t)}{dt} \right]$ - швидкість кутових переміщень тіла в часі відносно вісей y, x, z , рад/с.

Математичне моделювання силової взаємодії тілі

Функції, що описують сили між взаємодіючими тілами задаються координатами і описуються рівняннями напруженого сплайну [10], яке має вигляд:

$$S(L) = \frac{K_{j-1}}{\alpha} \frac{sh(\sqrt{\alpha} \cdot (x_j - L))}{sh(\sqrt{\alpha} \cdot h_j)} + \frac{K_j}{\alpha} \frac{sh(\sqrt{\alpha} \cdot (L - x_{j-1}))}{sh(\sqrt{\alpha} \cdot h_j)} + (y_{j-1} - \frac{K_{j-1}}{\alpha}) \cdot (\frac{x_j - L}{h_j}) + (y_j - \frac{K_j}{\alpha}) \cdot (\frac{L - x_{j-1}}{h_j}), \quad j = 2..N \quad (4)$$

де: α - параметр, який задається і може бути від 0 до безкінечності. Чим вище його значення, тим менше «прови-

сання» між точками (див. рис. 1) коефіцієнти K_{2-N-1} отримуються при вирішенні системи рівнянь:

$$K_{j-1} \cdot (\frac{1}{\alpha \cdot h_j} - \frac{1}{\sqrt{\alpha} \cdot sh(\sqrt{\alpha} \cdot h_j)} + K_j \cdot (\frac{ch(\sqrt{\alpha} \cdot h_j)}{sh(\sqrt{\alpha} \cdot h_j)} + \frac{ch(\sqrt{\alpha} \cdot h_{j+1})}{sh(\sqrt{\alpha} \cdot h_{j+1})}) \cdot \frac{1}{\sqrt{\alpha}} - \frac{1}{\alpha} \cdot (\frac{1}{h_j} + \frac{1}{h_{j+1}})) + K_{j+1} \cdot (\frac{1}{\alpha \cdot h_{j+1}} - \frac{1}{\sqrt{\alpha} \cdot sh(\sqrt{\alpha} \cdot h_{j+1})}) = \frac{y_{j+1} - y_j}{h_{j+1}} - \frac{y_j - y_{j-1}}{h_j}, \quad j = 2..N-1 \quad (5)$$

Рівняння для знаходження коефіцієнтів K_1 та K_N

$$K_1 \cdot (-\frac{1}{\alpha \cdot h_2} - \frac{ch(\sqrt{\alpha} \cdot h_2)}{sh(\sqrt{\alpha} \cdot h_2)}) + K_2 \cdot (\frac{1}{\alpha \cdot h_2} + \frac{1}{\sqrt{\alpha} \cdot sh(\sqrt{\alpha} \cdot h_2)}) = y'_1 - \frac{y_2 - y_1}{h_2} \quad (6)$$

$$K_{N-1} \cdot (-\frac{1}{\alpha \cdot h_N} - \frac{1}{sh(\sqrt{\alpha} \cdot h_N)}) + K_N \cdot (\frac{1}{\alpha \cdot h_N} + \frac{ch(\sqrt{\alpha} \cdot h_N)}{sh(\sqrt{\alpha} \cdot h_2)}) = y'_N - \frac{y_N - y_{N-1}}{h_N} \quad (7)$$

де L – переміщення, між тілами, м;
 $[x, y]$ - координати (абсциса та ордината), які описують показники сили в характерних точках, [м, кН];

K – коефіцієнти напруженого сплайна;

h_j – різниця між x_j та x_{j-1} при $j=2..N$;

y'_1 - похідна у точці x_1 ;

y'_N - похідна у точці x_N .

Використовуючи апроксимацію силової взаємодії між тілами можливо моделювати більш реальний (плавний, наближений до натури) процес коливань тіл.

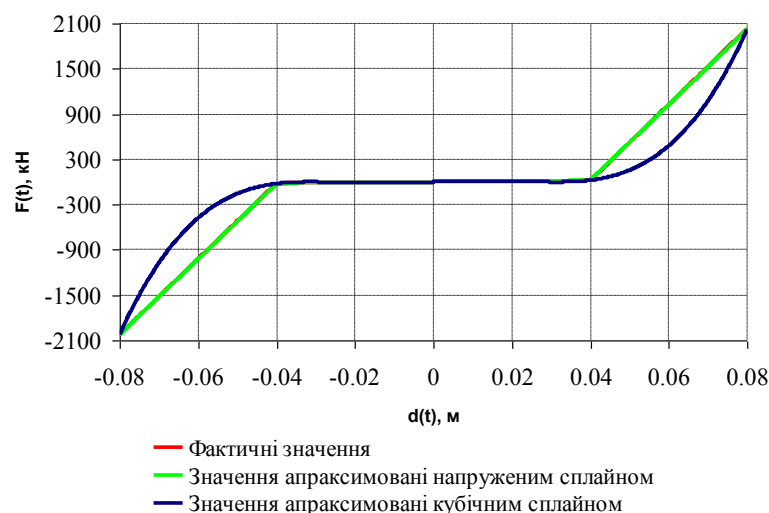


Рис. 1. Приклад моделювання силового зв'язку між тілами при апроксимації характерних точок різними видами сплайнів

Для моделювання силової взаємодії між тілами (див. рис. 2), може бути використан вираз наведений у формулі 8.

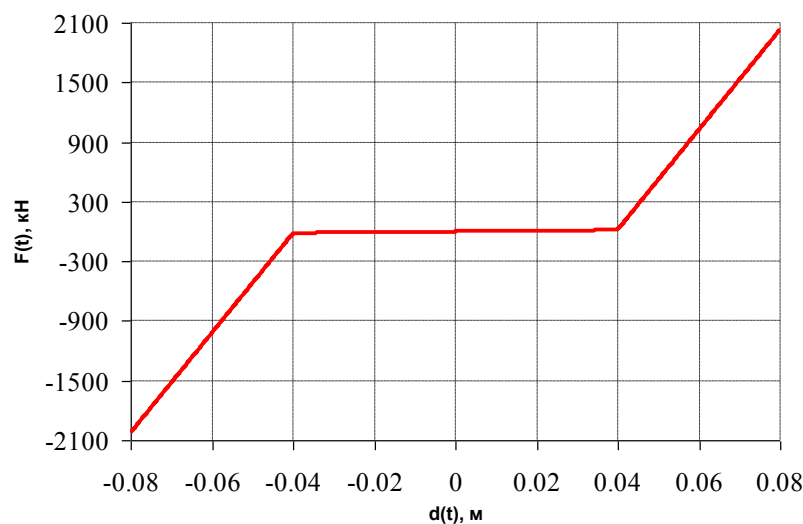


Рис. 2. Приклад моделювання багатолінійної пружнодисипативної функції

Багатолінійна пружнодисипативна функція

$$F(t) = \begin{cases} y_1 + k_1 \cdot (z(t) - x_1) + b_1 \cdot \left(\frac{dz(t)}{dt} \right) & z(t) \leq x_1 \\ y_i + k_{i+1} \cdot (z(t) - x_i) + b_{i+1} \cdot \left(\frac{dz(t)}{dt} \right) & x_{i+1} > z(t) > x_i, \quad i = 1..n-1; \\ y_n + k_{n+1} \cdot (z(t) - x_n) + b_{n+1} \cdot \left(\frac{dz(t)}{dt} \right) & z(t) \geq x_n \end{cases} \quad (8)$$

Функція «сухе тертя»:

$$F(t) = k \cdot z(t) + F_{tr} \cdot \text{sign}\left(\frac{dz(t)}{dt}\right); \quad (9)$$

де: n - загальна кількість ординат характерних точок, шт;

y - ординати характерних точок, що описують залежність сили від переміщення тіла, кН;

x - абсциси характерних точок, що описують залежність сили від переміщення тіла, м;

$z(t)$ - переміщення тіла або двох взаємодіючих тіл, м;

$\frac{dz(t)}{dt}$ - швидкість переміщення тіла або двох взаємодіючих тіл, м/с²;

F_{tr} - сила сухого тертя, кН;

k - жорсткість зв'язки між двома тілами, кН/м;

b - коефіцієнт дисипації зв'язки між двома тілами, кН·м/с.

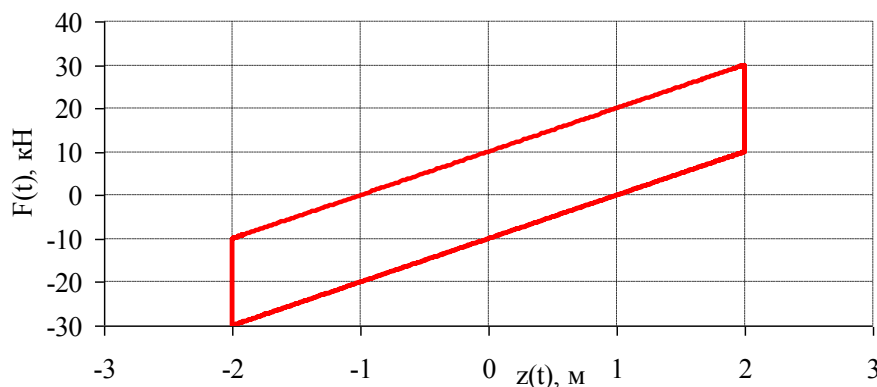


Рис. 3. Приклад моделювання функції «сухого тертя»

Моделювання силового зв'язку між колесом та рейкою можливо записати у наступному вигляді:

$$\begin{Bmatrix} F_{y11} \\ F_{y12} \\ F_{x11} \\ F_{x12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_{11} \cdot \cos(n_{11}) + R_{kz11} \cdot \sin(n_{11}) + K_{21} \cdot \cos(n_{21}) + R_{kz21} \cdot \sin(n_{21}) \\ K_{12} \cdot \cos(n_{12}) - R_{kz12} \cdot \sin(n_{12}) + K_{22} \cdot \cos(n_{22}) - R_{kz22} \cdot \sin(n_{22}) \\ F_{x11} + F_{x21} \\ F_{x12} + F_{x22} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

де:

F_{yij} , $i=1..2$, $j=1..2$; - сили, що діють на колісну пару та рейку відносно вісі y , кН;

F_{Xij} , $i=1..2$, $j=1..2$; - сили, що діють на колісну пару та рейку відносно вісі x , кН;

$$F_{xij} = \frac{k_{cij}}{\sqrt{(1 + h_{ij}^2)} \cdot \varepsilon_{ij}^2} \cdot \varepsilon_{ij} \cdot k_{ij}, \quad i=1..2, \quad j=1..2;$$

- сили, що діють на колесо або рейку вздовж вісі x в точках контакту тіл, кН;

$$K_{ij} = \frac{k_{cij}}{\sqrt{(1+h_{ij}^2) \cdot \varepsilon_{ij}^2}} \cdot \varepsilon_{ij} \cdot k_{ij}, \quad i=1..2, \quad j=1..2;$$

- сили, що діють на колесо або рейку вздовж вісі y в точках контакту тіл кН;

$$h_{ij} = \frac{k_{cij}}{Rkz_{ij} \cdot f_{tr}}, \quad i=1..2, \quad j=1..2;$$

$$k_{cij} = Rkz_{ij} \cdot (235 - Rkz_{ij} \cdot (2.4 - 0.01 \cdot Rkz_{ij})), \\ i=1..2, \quad j=1..2;$$

$$\varepsilon_{ij} = \sqrt{(\varepsilon_{xij}^2 + \varepsilon_{yij}^2)}, \quad i=1..2, \quad j=1..2;$$

- відносна швидкість проковзування колеса по рейці;

$$\varepsilon_{xij} = \frac{v \cdot dr_{ij}}{r_{ij}} + (-1)^{j+1} \cdot \frac{d\psi(t)}{dt} \cdot s, \quad i=1..2, \quad j=1..2;$$

- відносна швидкість проковзування колеса по рейці по вісі x ;

$$\varepsilon_{yij} = \frac{dy(t)}{dt} - r_{1j} \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} - v \cdot \frac{d\psi(t)}{dt}, \quad - \text{ відносна} \\ i=1..2, \quad j=1..2;$$

- швидкість проковзування колеса по рейці по вісі y ;

$$dr_{ij} = ((-1)^{j+1} \cdot n_{ij} \cdot y(t) - n_{ij} \cdot (nerpyt) + dnj \cdot (n1 - n_{ij})), \\ i=1..2, \quad j=1..2;$$

- зміна радіуса колеса у точках i, j , м;

$$Rkz1i = \begin{cases} Rkz + Fz1i, & dgr1i \geq 0 \\ Rkz + Fz1i - Rkz2i, & dgr1i < 0 \end{cases} \quad i=1..2$$

$$Rkz2i = \begin{cases} 0, & dgr1i \geq 0 \\ -\frac{cpy \cdot dgr1i}{\sin(n2)}, & dgr1i < 0 \end{cases} \quad i=1..2$$

$$dgr1i = dni + (-1)^i \cdot y(t) + (-1)^{i+1} \cdot nerpyt, \quad i=1..2$$

- $ni, n_{ij}, \quad i=1..2, j=1..2$ - кути взаємодії колеса та рейки у точках контакту, рад;

- $Rkz_{ij}, \quad i=1..2, j=1..2$ - вертикальні сили, що виникають між колесом та рейкою у точках контакту, кН;

- Rkz - вертикальна статична сила у точці контакту колеса та рейки, кН;

- $Fz_{ij}, \quad i=1..2, j=1..2$ - динамічні вертикальні сили, що виникають між колесом та рейкою у точках контакту, кН;

- cpy - жорсткість колії відносно вісі y , кН/м;

- $nerpyt$ - нерівність колії в плані, м;

- $r_{ij} = rad$ - середнє значення радіуса колеса, м;

- dr_{ij} - відхилення від середнього значення радіуса колеса, м;

- t - час взаємодії колеса з рейкою, с;

- v - швидкість руху колеса по рейці,

- м/с;

- s - половина відстані між кругами кочення коліс, м;

- f_{tr} - коефіцієнт тертя колеса по рейці;

- $dnj = shirpyt, \quad j=1..2;$ - ширина колії в точках взаємодії колеса та рейки, м;

- $y(t)$ - координата положення колеса у часі відносно вісі y , м;

- $\frac{dy(t)}{dt}$ - швидкість зміни координати положення колеса у часі відносно вісі y , м/с;

- $\theta(t)$ - кут повороту колеса у часі відносно вісі x , рад;

- $\frac{d\theta(t)}{dt}$ - швидкість зміни кута повороту колеса у часі відносно вісі x , рад/с;

- $\psi(t)$ - кут повороту колеса у часі відносно вісі z , рад;

- $\frac{d\psi(t)}{dt}$ - швидкість зміни кута повороту колеса у часі відносно вісі z , рад/с;

- Для визначення коефіцієнтів дисипації у вертикальній та горизонтальній площині при моделюванні нахилених демпферів рухомого складу можна використувати наступне рівняння:

$$\begin{cases} \beta z(t) \\ \beta y(t) \end{cases} = \begin{cases} \beta \cdot \sin(\alpha(t)) \\ \beta \cdot \cos(\alpha(t)) \end{cases} \quad (11)$$

$$\alpha(t) = \left| \arctan \left(\frac{z_0 - z(t)}{y_0 - y(t) + k} \right) \right| \quad (12)$$

де: z_0 - відстань від верхнього до нижнього кріплення демпфера у вертикальній площині;

y_0 - відстань від верхнього до нижнього кріплення демпфера у горизонтальній площині;

$z(t)$ - зміна відстані у вертикальній площині за рахунок взаємодії тіла або тіл;

$y(t)$ - зміна відстані у горизонтальній площині за рахунок взаємодії тіла або тіл;

$k \rightarrow 0$ - допоміжна величина;

β - коефіцієнт дисипації демпфера.

Моделювання геометрії колії

Геометричні нерівності колії можуть бути поділені на макронерівності (проектне положення колії в плані та профілі) та на локальні нерівності (відступи від поганого поточного утримання колії). Геометрія колії може задаватися по координатно (за натурними вимірами) у вигляді масиву точок апроксимованих напруженим або кубічним сплайном.

Макронерівності колії поділені на нерівності колії в плані та профілі. Макронерівність колії в плані задається наступним чином:

- визначається радіус на інтервалі x

$$R(x) = \begin{cases} \infty, & x \leq 0 \\ \frac{Rad \cdot l_{pk1}}{x}, & l_{pk1} \geq x \geq 0 \\ Rad, & l_{kk} + l_{pk1} \geq x \geq l_{pk1} \\ \frac{Rad \cdot l_{pk2}}{l_{kk} + l_{pk1} + l_{pk2} - x}, & l_{kk} + l_{pk1} + l_{pk2} > x > l_{kk} + l_{pk1} \\ \infty, & x \geq l_{kk} + l_{pk1} + l_{pk2} \end{cases} \quad (13)$$

де: x - ордината положення кривої в плані, м;

Rad - радіус кругової кривої, м;

l_{pk1} - довжина першої перехідної кривої, м;

l_{pk2} - довжина другої перехідної кривої, м;

l_{kk} - довжина кругової кривої, м;

- після визначення радіуса для отримання реального положення колії в плані потрібно вирішити наступне рівняння

$$\frac{d^2 y(x)}{dx^2} = \left(\sqrt{1 + \left(\frac{dy(x)}{dx} \right)^2} \right)^3 \cdot \frac{1}{R(x)}; \quad (14)$$

де: $y(x)$ - абсциса положення кривої
в залежності від ординати, м.

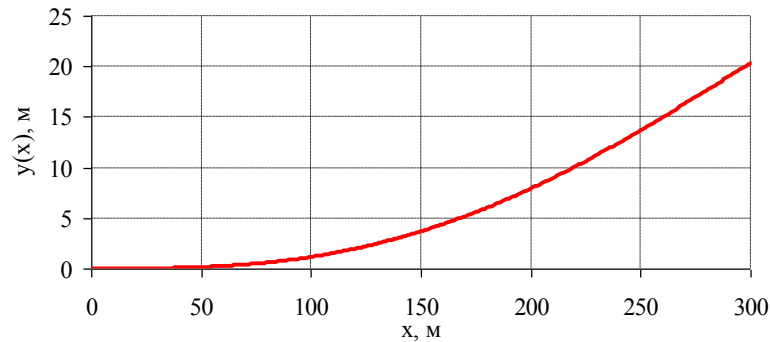


Рис. 4. Приклад моделювання реального положення колії в плані з радіусом 1500 м та перехідними кривими і круговою кривою з довжинами по 100 м

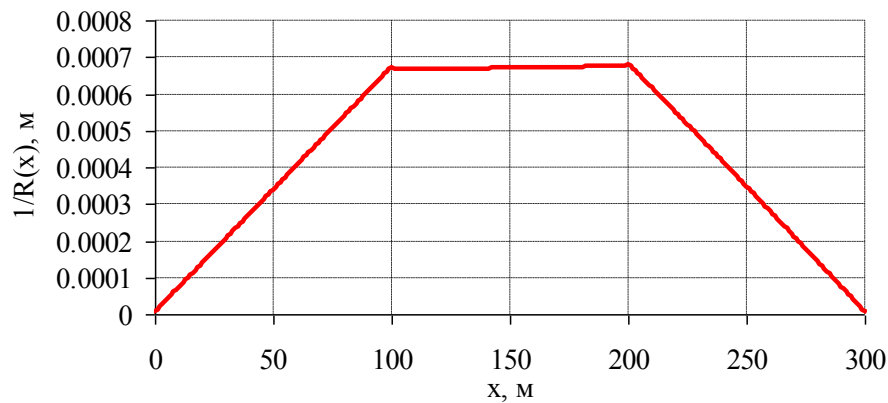


Рис. 5. Приклад моделювання кривизни колії при радіусі 1500 м та перехідних кривих і кругової кривої з довжинами по 100 м

Макронерівність колії в профілі (підвищення зовнішньої рейки в кривій) може бути задана наступним чином:

$$h(x) = \begin{cases} y_1, & x \leq x_1 \\ y_1 + (y_2 - y_1) \cdot \left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right)^2 \cdot \left(3 - \left(\frac{2 \cdot x - x_1}{x_2 - x_1} \right) \right), & x_2 > x > x_1 \\ y_2, & x_3 \geq x \geq x_2; \\ y_3 + (y_4 - y_3) \cdot \left(\frac{x - x_3}{x_4 - x_3} \right)^2 \cdot \left(3 - \left(\frac{2 \cdot x - x_3}{x_4 - x_3} \right) \right), & x_4 \geq x > x_3 \\ y_4, & x > x_4 \end{cases} \quad (15)$$

де: $h(x)$ - підвищення рейки в залежності від ординати x , м;
 y_1, x_1 - абсциса та ордината початку першої перехідної кривої, м;
 y_2, x_2 - абсциса та ордината кінця першої перехідної кривої, м;

y_3, x_3 - абсциса та ордината кінця кругової кривої, м;
 y_4, x_4 - абсциса та ордината кінця другої перехідної кривої, м;

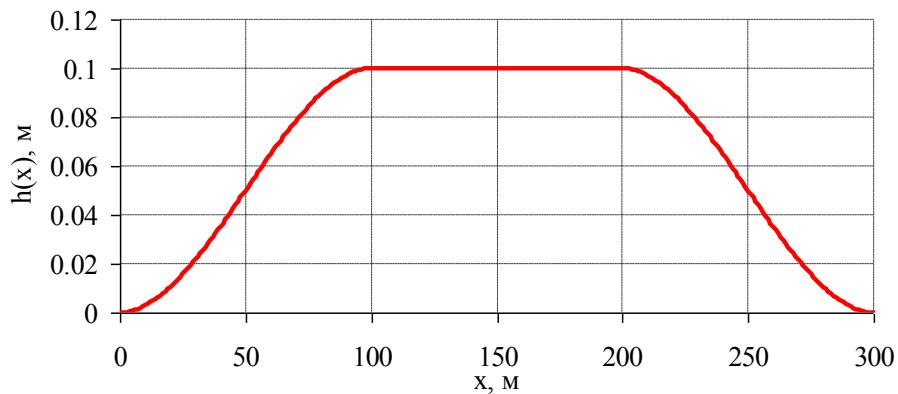


Рис. 6. Приклад моделювання положення колії в профілі при підвищенні 0,1 м та перехідних кривих і кругової кривої з довжинами по 100 м

Локальна нерівність колії як у плані та і у профілі може бути задана по координатно (за результатами натурних вимірю-

вань) або у наступній математичній формі:

$$y(x) = \begin{cases} 0, & x - lt > lz \\ \frac{a}{2} \cdot \left(1 - \cos \left(\pi \cdot 2 \cdot \frac{(x - lt)}{lz} \right) \right), & 0 \leq x - lt \leq lz \\ 0, & x - lt < 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$x = v \cdot t;$$

де: a - глибина нерівності колії, м;
 x - ордината нерівності, м;
 lz - довжина нерівності, м;
 lt - ордината початку нерівності, м;

v - швидкість руху тіла по нерівності, м/с;

t - час переміщення тіла по нерівності, с.

Похідна локальної нерівності для визначення дисипативної сили у контакті колесо-рейка має наступний вигляд:

$$\frac{dy(x)}{dx} = \begin{cases} 0, & x - lt > lz \\ a \cdot \sin \left(\pi \cdot 2 \cdot \frac{(x - lt)}{lz} \right) \cdot \frac{\pi \cdot v}{lz}, & 0 \leq x - lt \leq lz \\ 0, & x - lt < 0 \end{cases} \quad (17)$$

$x = v \cdot t;$

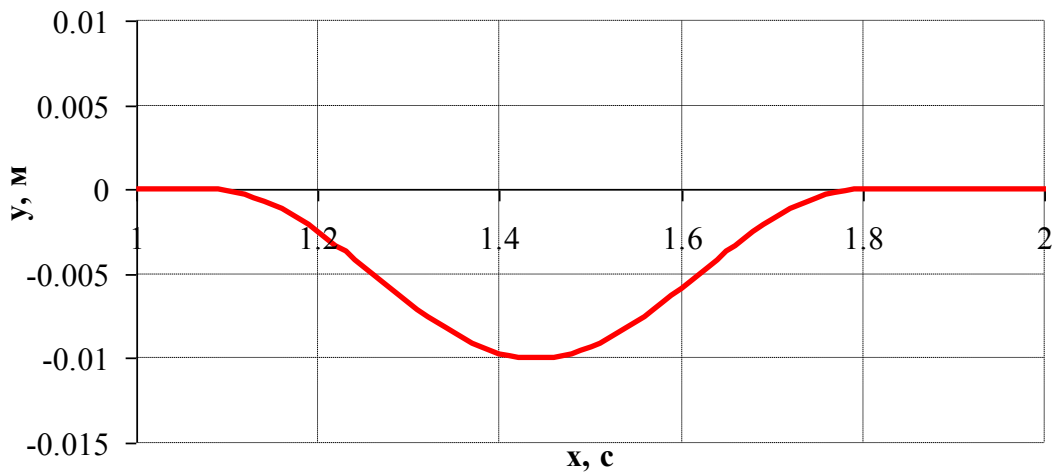


Рис. 7. Приклад моделювання локальної нерівності колії з амплітудою 0,01 м на довжині 10 м з початком на 15 метрі при швидкості руху тіла по ній 50 км/год.

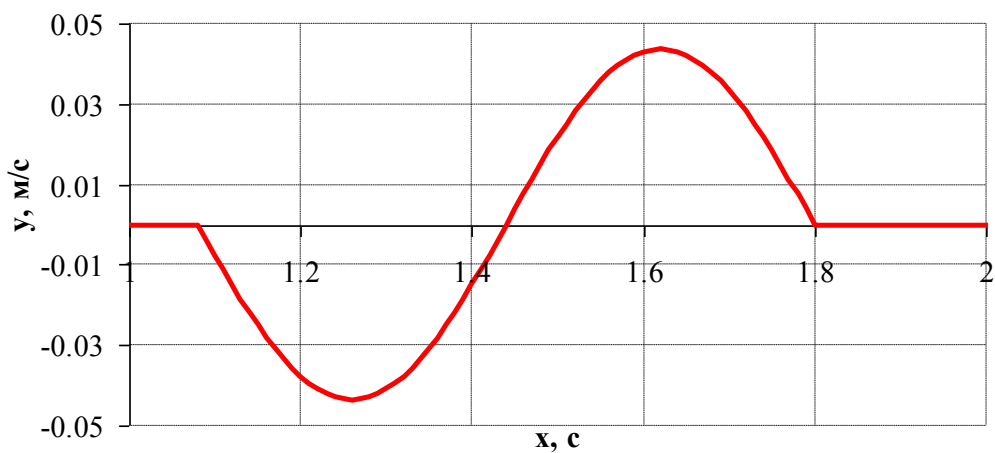


Рис. 8 .Приклад моделювання похідної від нерівності колії амплітудою 0,01 м на довжині 10 м з початком на 15 метрі зі швидкістю руху тіла по ній 50 км/год.

Висновок

Для проведення теоретичних розрахунків, для вивчення процесів динаміки взаємодії колії і рухомого складу, розроблення нових нормативів утримання колії [11], а також для більш досконалого проведення експериментальних досліджень впливу рейкових екіпажів на колію [12], була вище приведена удосконалена методика математичного моделювання взаємодії колії та будь-якого рухомого складу.

Представлена методика має наступні удосконалення та доповнення до раніше відомих тим, що можливо:

- моделювати процеси взаємодії колії та рухомого складу без гіпотези геометричної лінійності переміщень та деформацій. Це дозволяє отримувати більш точні результати ніж з використанням гіпотези у кривих радіусом менше ніж 1000 метрів та при швидкостях руху понад 140 км/год;

- задавати фактичний стан колії за результатами натурних вимірів вагона ко-

лієвимірювача та ручної зйомки колії, що є особливо дуже важливим під час проведення експериментальних досліджень;

- моделювати дисипативні та пружні характеристики силової взаємодії тіл, інерційних характеристик тіл, як змінних у часі та змінних в залежності від місця розташування у колії.

Список літератури

1 Стратегія розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року. [Текст] Рішення КМУ від 16.12.2009 р. №1555-р.

2 Хусидов, В. В. Динамика пассажирского вагона и пути модернизации тележки КВЗ-ЦНИИ [Текст] / В. В. Хусидов, А. А. Хохлов, Г. И. Петров, В. Д. Хусидов // - М.: МИИТ, 2001. – 162 с.

3 Popp, K. System Dynamics [Текст] / K. Popp // GmbH, Heidelberg. - 2003. – 490с.

4 Мямлин, С. В. Моделирование динамики рельсовых экипажей.[Текст] / С. В. Мямлин -Д.: Новая идеология, 2002. - 240 с

5 Вериги, М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М.Ф. Вериги, А. Я. Коган//. - М.: Транспорт, 1986. – 559 с.

6 Ушкалов, В. Ф. Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств [Текст]/ В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, В. С. Иккол, и др. АН УССР. Ин-т техн. Механики. - Киев: Наук. Думка, 1989. - 240 с.

7 Говоруха, В. В. Моделирование движения рельсовых экипажей [Текст]. - Киев: Наук. Думка, 2006. - 460 с.

8 Ромен, Ю.С. О нелинейных колебаниях железнодорожного экипажа в кривых произвольного очертания [Текст]. - МежВуз., сб. науч. трудов/ ВНИЖТ, 1967, вып. 347, с 5-26.

9 Рибкін, В. В. Особливості математичної моделі взаємодії колії та рухомого складу в межах стрілочного переводу [Текст] / В. В. Рибкін, К. Л. Каленик // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. тр-ту ім. акад. В. Лазряна, - 2009. -Вип. 30. - С. 204-207.

10 В. В. Носач Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров [Текст] - М.:МИКАП, 1994. - 382 с.

11 Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії. ЦП/0267 [Текст] / В. В. Рибкін, О. М. Патласов, П.В. Панченко та інші.// - К.: Транспорт України., 2012. - 42 с.

12 Рибкін В. В., Експериментальні дослідження взаємодії колії та рухомого складу при швидкостях руху до 160 км/год [Текст] / В. В. Рибкін, О. М. Патласов, П. В. Панченко // Збірник наукових праць Донецького ін-ту залізн. тр-ту, - 2011. № 25. - С. 191-198.

Анотації:

Викладена удосконалена методика математичного моделювання рухомого складу та колії. Приведена методика може бути використана та використовується для взаємодії колії та будь-яких рейкових екіпажів при швидкостях руху понад 140 км/год

Приведена усовершенствованная методика математического моделирования подвижного состава и пути. Данная методика может быть использована и используется для изучения взаимодействия пути и любых рельсовых экипажей при скоростях движения свыше 140 км/час.

The advanced technique of mathematical modelling of a rolling stock and way is resulted. The given technique suits studying of interaction of a way and any rail crews at speeds over 140 km/hour..