

МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНІ КОМПОНЕНТИ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РУХОМ ПОЇЗДА

*д-р техн. наук, проф. О.Ю. Заковортний, асп. П.Е. Решетнікова.
Національний технічний університет "Харківський політехнічний
інститут", м. Харків*

Сучасні вітчизняні поїзди оснащені комп'ютерними системами управління, які виконують задачі, спрямовані на мінімізацію витрат енергоресурсів та на підвищення рівня безпеки перевезень. Для підвищення якості роботи таких систем необхідно доповнити існуючі системи новими програмними та апаратними компонентами, які можуть бути використані для оцінки роботи рухомого складу та окремих його складових. Отже, є актуальною задача розроблення моделей, методів та програмних компонентів для систем управління рухом поїзда та проведення досліджень на отриманих моделях.

У доповіді пропонується розглянути комплексну математичну модель, яка б дозволяла проводити дослідження вертикальних коливань рухомого складу, які виникають під час руху поїзда перегonom, для її подальшого використання у системі підтримки прийняття рішень машиністом комп'ютерних систем управління рухом дизель-поїзда [1, 2].

Колівання поїзда та його складових традиційно представляють у формі системи диференціальних рівнянь другого порядку.

$$\begin{aligned} m_{\text{в}} \ddot{z}_{\text{в}1} - \beta_2 (\dot{z}_{\text{к}} - \dot{z}_{\text{в}1} - l_{\text{к}} \dot{\varphi}_{\text{к}}) - c_2 (z_{\text{к}} - z_{\text{в}1} - l_{\text{к}} \varphi_{\text{к}}) + 2\beta_1 \dot{z}_{\text{в}1} + 2c_1 z_{\text{в}1} = \\ \beta_1 (\dot{\eta}_1 + \dot{\eta}_2) + c_1 (\eta_1 + \eta_2); \\ m_{\text{в}} \ddot{z}_{\text{в}2} - \beta_2 (\dot{z}_{\text{к}} - \dot{z}_{\text{в}2} - l_{\text{к}} \dot{\varphi}_{\text{к}}) - c_2 (z_{\text{к}} - z_{\text{в}2} - l_{\text{к}} \varphi_{\text{к}}) + 2\beta_1 \dot{z}_{\text{в}2} + 2c_1 z_{\text{в}2} = \\ \beta_1 (\dot{\eta}_3 + \dot{\eta}_4) + c_1 (\eta_3 + \eta_4); \\ J_{\text{в}у} \ddot{\varphi}_{\text{в}1} + 2l_{\text{в}}^2 \beta_1 \dot{\varphi}_{\text{в}1} + 2l_{\text{в}}^2 c_1 \varphi_{\text{в}1} = l_{\text{в}} \beta_1 (\dot{\eta}_1 - \dot{\eta}_2) + l_{\text{в}} c_1 (\eta_1 - \eta_2); \\ J_{\text{в}у} \ddot{\varphi}_{\text{в}2} + 2l_{\text{в}}^2 \beta_1 \dot{\varphi}_{\text{в}2} + 2l_{\text{в}}^2 c_1 \varphi_{\text{в}2} = l_{\text{в}} \beta_1 (\dot{\eta}_3 - \dot{\eta}_4) + l_{\text{в}} c_1 (\eta_3 - \eta_4); \\ m_{\text{к}} \ddot{z}_{\text{к}} - \beta_2 (2\dot{z}_{\text{к}} - \dot{z}_{\text{в}1} - \dot{z}_{\text{в}2}) - c_2 (2z_{\text{к}} - z_{\text{в}1} - z_{\text{в}2}) = 0; \\ J_{\text{к}у} \ddot{\varphi}_{\text{к}} + \beta_2 l_{\text{к}} (2l_{\text{к}} \dot{\varphi}_{\text{к}} - \dot{z}_{\text{в}1} - \dot{z}_{\text{в}2}) + c_2 l_{\text{к}} (2l_{\text{к}} \varphi_{\text{к}} - z_{\text{в}1} - z_{\text{в}2}) = 0, \end{aligned}$$

де $z_{\text{в}1}$, $z_{\text{в}2}$, $z_{\text{к}}$ – підстрибування візка та кузова, а $\varphi_{\text{в}1}$, $\varphi_{\text{в}2}$, $\varphi_{\text{к}}$ – кути галопування візка та кузова. Літерами c_1 , β_1 , c_2 , β_2 позначено коефіцієнти жорсткості та в'язкого тертя ресорного підвишування та центрального підвишування відповідно. $l_{\text{в}}$ – половина відстані між колісними парами візка, $l_{\text{к}}$ – половина відстані між візками кузова.

Ліва частина рівнянь відповідає за власні коливання візків та кузову вагона поїзда, у правих частинах рівнянь візків описані збурюючі впливи, через які візки приходять у коливальний стан.

У якості збурень для вертикальних коливань рухомого складу зазвичай використовується еквівалентна геометрична нерівність η . Існує багато способів представлення еквівалентної нерівності в залежності від бажаного ступеня складності симуляції, що виконується. У загальному, найпростішому випадку застосовується одnogорба нерівність залізничного шляху, яка являє собою рівняння простих гармонічних коливань із заданою амплітудою та частотою, що залежить від довжини нерівності, моменту часу та швидкості руху вагона. Окрім одnogорбої нерівності для більш точних розрахунків може бути застосована двогорба нерівність, яка найкраще підходить для імітації періодичного впливу стиків рейок на рух поїзда [3].

Оскільки нерівності рейок через їх нерівномірний знос також мають випадковий характер, при моделюванні вертикальних коливань треба враховувати їх стохастичну природу. Для цього використовується підхід із застосуванням еквівалентної геометричної нерівності η із заданими спектральними характеристиками, які були отримані спеціалістами шляхом аналізу експериментальних даних вимірювань вагонів-колійовимірювачів. Для моделювання таких нерівностей авторами доповіді пропонується використання статистично-інформованої штучної нейронної мережі, яка була вперше представлена у роботі [4]. Статистично-інформована нейронна мережа є нейронною мережею глибокого навчання та спеціалізується на відтворенні стохастичних процесів за їх характеристиками. Вона складається з декількох шарів нейронної мережі довгої короткострокової пам'яті та повноз'язного лінійного шару для перетворення даних. Нейронна мережа, навчена на статистичних характеристиках нерівностей, автокореляційній функції та щільності розподілу ймовірностей, здатна генерувати випадкові нерівності залізничного шляху, які можуть бути використані разом із двогорбою нерівністю для отримання більш точного відображення еквівалентної нерівності.

Вертикальні коливання рухомого складу, викликані нерівностями залізничної колії, мають багатогранний негативний вплив на стан складових поїзда та комфорт і безпеку його пасажирів. Для оцінки негативного впливу коливань на комфорт можуть бути використані різні методи, які описані у стандартах ISO-2631, UIC 513R та EN-12299. Одним з методів з оцінки якості та комфорту перевезення пасажирів є метод Шперлінга. За методом Шперлінга вертикальні прискорення кузова, отримані під час руху поїзда, за допомогою кривих зважування оцінюються за спеціальною шкалою, яка показує, чи є рівень коливань достатньо сильним, щоб нести шкоду здоров'ю пасажирів.

Для оцінювання результатів моделювання вертикальних коливань на імітаційній моделі, що розроблена, які були отримані у ході різноманітних експериментів зі зміною швидкостей руху, у режимах розгону та гальмування, та із різним рівнем пошкодження рейок під колесами поїзда,

було розроблено відповідний програмний компонент. Програмний компонент розраховує рівень якості та комфорту перевезення у процесі руху за методом ковзного вікна та може сигналізувати про занадто високий рівень коливань машиністові поїзда.

Отже, у доповіді представлений подальший розвиток комплексної моделі руху дизель-поїзда, яку доповнено рівняннями вертикальних коливань візків та вагона поїзда під час руху перегonom. Імітаційну модель представлено у системі MATLAB/Simulink. На ній можуть бути проведені дослідження як на сталій швидкості дизель-поїзда, так і у перехідних режимах, таких як розгін та гальмування, виконуватися дослідження залежності коливань від параметрів підвищування та стану залізничної колії як стикового, так і безстикового шляху. У роботі вперше використано статистично-інформовану нейронну мережу для моделювання еквівалентної нерівності рейок. Також представлено програмний компонент, розроблений у пакеті MATLAB, для оцінки впливу коливань рухомого складу на комфорт пасажирів поїзда за методом Шперлінга. Розроблені моделі, методи та програмні компоненти можуть бути використані у системі підтримки прийняття рішень машиністом дизельних поїздів України.

Список літератури: 1. *Решетнікова П. Е.* Математична модель вертикальних коливань рухомого складу, викликаних нерівностями залізничної колії / *Решетнікова П. Е., Заковоротний О. Ю.* // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць Том 4 № 78, 2024, с. 42–45 2. *Решетнікова П. Е.* Моделювання вертикальних коливань поїзда, що виникають під час руху залізничною колією зі стиковою нерівністю / *Решетнікова П. Е., Заковоротний О. Ю.* // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць Том 1 № 79, 2025, с. 49–44 3. *Заковоротний О. Ю.* Моделювання геометричної нерівності залізничної колії на основі нейронної мережі глибокого навчання / *Заковоротний О. Ю., Решетнікова П. Е.* // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2025. – No 2 (14). – С. 44 – 61. 4. *Zhu Yu.* Learning stochastic dynamics with statistics-informed neural network / *Zhu Yu., Tang Yu., Kim Ch.* // *Journal of Computational Physics.* – 2022. – 474 p.