

П. Е. Решетнікова, О. Ю. Заковоротний

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ПОЇЗДА, ЩО ВИНΙΚАЮТЬ ПІД ЧАС РУХУ ЗАЛІЗНИЧНОЮ КОЛІЄЮ ЗІ СТИКОВОЮ НЕРІВНІСТЮ

Анотація. Залізничний транспорт багато років залишається одним із основних перевізників вантажів та пасажирів в Україні. Незважаючи на це, більшість поїздів та рейок основних напрямків сполучення знаходяться в незадовільному стані. В умовах бойових дій та подальшого довгого післявоєнного відновлення на перший план виходять питання подовження життя вже існуючому рухомому складу та економії енергоресурсів. Також для збереження конкурентоспроможності поїздів відносно інших видів транспорту гостро стоїть питання підвищення середніх швидкостей руху та комфорту пасажирів на залізниці. Для вирішення цих проблем необхідна розробка комплексних моделей, які би враховували фактори, які суттєво впливають на витрати палива, безпеку та комфорт пасажирів. До таких факторів можна віднести коливання рухомого складу. Роботу присвячено розробці імітаційної моделі вертикальних коливань (підстрибування та галопування) кузова та візків вагона поїзда, які залежать від нерівностей залізничної колії. Розроблена комплексна імітаційна модель руху вагона поїзда перегонном з урахуванням вертикальних коливань кузова вагона та його візків у пакеті MATLAB Simulink дозволяє досліджувати залежність цих коливань від швидкості рухомого складу, параметрів його системи підвищення та нерівностей рейкового шляху під колісними парами не тільки в режимі підтримки заданої швидкості, а й у режимі вибігу та перехідних режимах (розгоні, гальмуванні). Отримана імітаційна модель може бути використана для подальшого проведення на ній досліджень коливальних процесів поїзда на обраних ділянках шляху, для отримання на ній даних для тренування нейронної мережі для раннього визначення резонансних коливань вагона поїзда, а також може бути використана у системах підтримки прийняття рішень (СППР) бортових систем керування рухомого складу поїздів України.

Ключові слова: математична модель, система підтримки прийняття рішень, бортові системи керування, рухний склад, коливальний процес, підстрибування, галопування, резонансна швидкість.

Вступ

Постановка проблеми. Залізничний транспорт роками займає провідну роль у транспортній системі України. Абсолютна більшість вантажів, що прямують як у різні регіони нашої країни, так і закордон, перевозяться за допомогою рухомого складу залізниць. Чималою є також частка залізничного транспорту у пасажирських перевезеннях.

Незважаючи на незаперечну важливість залізниць для підтримки та подальшого розвитку економіки України, на даний час більшість поїздів знаходиться у незадовільному стані та вже давно вичерпала свій ресурс, який було закладено при їх будівництві. До того ж близько половини головних колій потребують негайного ремонту [1, 2].

В умовах бойових дій, які супроводжуються ракетними ударами, що спрямовані на знищення об'єктів критичної інфраструктури, зокрема енергетики та транспорту, та подальшого довгого післявоєнного відновлення на перший план виходять питання подовження життя вже існуючому рухомому складу та економії енергоресурсів. Також для збереження конкурентоспроможності поїздів відносно інших видів транспорту гостро стоїть питання підвищення середніх швидкостей руху та комфорту пасажирів на залізниці.

Для вирішення цих проблем необхідна розробка комплексних моделей, які би враховували фактори, які суттєво впливають на витрати палива, безпеку та комфорт пасажирів. У даній роботі пропонується звернути увагу на такі динамічні процеси, як вертикальні коливання рухомого складу. Вертикальні коливання поїзда виникають внаслідок дії вертикальних сил, які наявні у процесі руху. До них відносяться:

підстрибування, коли надресорні маси вагона переміщуються вгору і вниз, залишаючись паралельними початковому положенню, та галопування, коли надресорні маси обертаються навколо осі, що перпендикулярна осі руху поїзда. Ці коливання можуть бути викликані нерівностями рейкового шляху, пошкодженнями та зношенням ободів коліс, незбалансованою системою підвищення тощо. Коливання рухомого складу мають багатогранний негативний вплив на потяг, як на систему в цілому, так і на його частини, призводячи до пришвидшеного зносу коліс та ресорного комплексу, а також на залізничні колії, викликаючи їх різноманітні пошкодження. Підстрибування та галопування призводять до втрати зчеплення коліс, підвищенню опору середовища рухові, а отже й до збільшення витрат палива [3]. Підстрибування поїзда, особливо за підвищення швидкостей руху, можуть призводити до інерційних перенавантажень, що несуть загрозу безпеці та комфорту та можуть суттєво сказатися на здоров'ї пасажирів.

Навіть за наявності механічних гасників коливань, які використовуються у всіх сучасних пасажирських поїздах, надресорні частини візків та вагонів все ще приходять у коливальний стан. Гасіння коливань на залізницях України додатково ускладнюється й розповсюдженим використанням стикового рейкового шляху та загальним незадовільним станом шляхів. Особливо це відчувається під час перехідних процесів руху (розгоні та гальмуванні), де на пасажирів діють не тільки вертикальні, а й горизонтальні прискорення, що може призводити до підвищених дискомфорту та перенавантажень. Також дуже небезпечним є явище резонансу, коли частоти власних та вимушених коливань співпадають, що призводить до значного підвищення амплітуди цих коливань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційно при дослідженні коливань рухомого складу більше уваги приділяють поперечним коливанням (боковий винос, виляння), так як вони є природним процесом через особливості будови системи «колесо-рейка», а перевищення норм амплітудних значень несе загрозу виникнення аварійних ситуацій та сходів з поїзда з рейок [4–11].

Вертикальні, хоча й є не менш шкідливими та мають найбільший вплив на комфорт пасажирів [12, 13], описуються у сучасній літературі рідше та здебільшого у контексті оптимізації вибору жорсткості та коефіцієнтів демпфування для нових поїздів [14–16]. У деяких роботах, демпфуваннями навпаки нехтують та концентрують свою увагу на коливаннях саме колісних пар та можливій асиметричності нерівностей рейкового шляху [17].

Існуючі дослідження коливань у загальному випадку проводяться на заданій сталій швидкості, а тому не враховують перехідні такі перехідні процеси як розгін та гальмування [9–12, 14–18].

Моделювання збурень для вимушених коливань проводиться у різних роботах по-різному. Найрозповсюдженішим є використання так званої односторонньої нерівності, яка є найпростішою формою задання періодичної нерівності. У даній статті авторами для досягнення більш точних результатів пропонується використання двогорбої нерівності, запропонованої проф. Кудрявцевим [19].

У роботі [20] авторами була запропонована комплексна математична модель руху дизель-поїзда, яка включає в себе роботу еквівалентного двигуна поїзда, вертикальних переміщень (підстрибування) та кутів повороту (галоупування) візків та кузова вагона, які залежать від нерівності залізничної колії.

Метою статті є розробка комплексної імітаційної моделі руху вагона поїзда перегонном з урахуванням вертикальних коливань кузова вагона та його візків у пакеті MATLAB Simulink, яка б дозволяла б досліджувати залежність цих коливань від швидкості рухомого складу, параметрів його системи підвішування та нерівностей рейкового шляху під цими колесами не тільки в режимі підтримки заданої швидкості, а й у режимі вибігу та перехідних режимах (розгоні, гальмуванні), та подальший аналіз отриманих на ній результатів.

Виклад основного матеріалу

У роботі [20] представлено розрахункову схему коливань вагона у вертикальній повздовжній площині (рис. 1) та наведено систему диференціальних рівнянь коливань кузова та візків вагона з урахуванням нерівності залізничної колії.

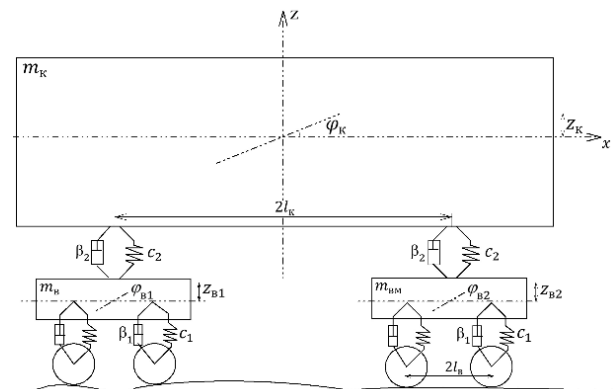


Рис. 1. Розрахункова схема коливань вагона у вертикальній повздовжній площині β_1, β_2 – коефіцієнти в'язкого тертя ресорного та центрального підвішування відповідно; c_1, c_2 – жорсткості ресорного та центрального підвішування відповідно; $z_{в1}, z_{в2}, z_k$ – підстрибування візка; $\varphi_{в1}, \varphi_{в2}, \varphi_k$ – галоупування візка та кузова; $l_в, l_к$ – половина відстані між колісними парами візка та між візками кузова; $m_{вм}, m_в, m_k$ – маси немоторного візка, моторного візка та кузова відповідно

На основі системи рівнянь, що наведено у роботі [20], складемо комплексну імітаційну модель руху вагона поїзда з осовою формулою 2о–2 та двоступінчастим ресорним підвішуванням, яка враховує вертикальні коливання кузова вагона та його візків, що викликані нерівностями колії, як за сталої швидкості, так і під час розгону та гальмування.

Опис імітаційної моделі. Моделювання виконувалося у системі MATLAB Simulink. Модель (рис. 2) складається з двох основних блоків: блоку «Задання швидкості», у якому задається швидкість за допомогою перемикачів позицій контролера машиніста поїзда, що дозволяє моделювати розгін, підтримання швидкості та гальмування поїзда, блоку «Нерівності», у якому розраховуються нерівності залізничної колії, та блоку «Коливання».

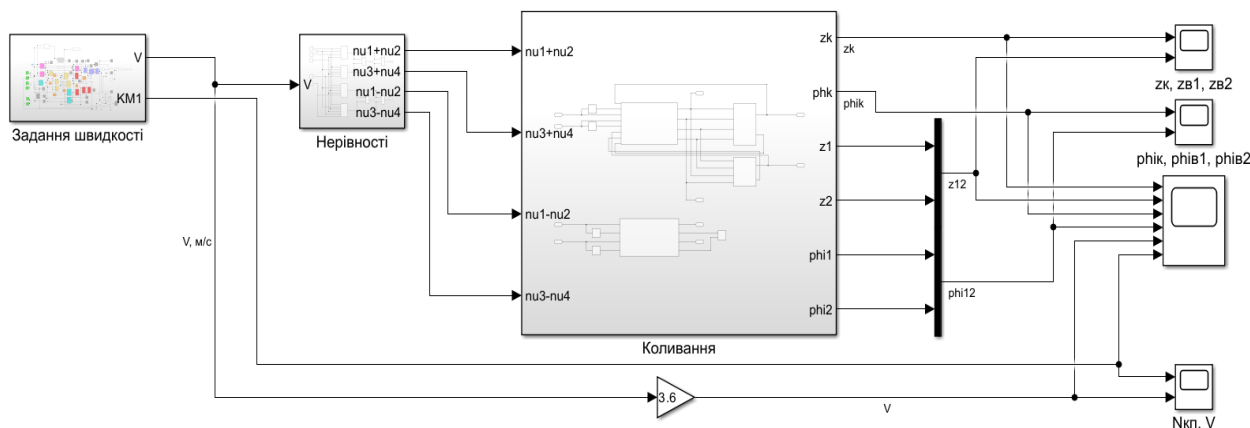


Рис. 2. Комплексна імітаційна модель коливань рухомого складу

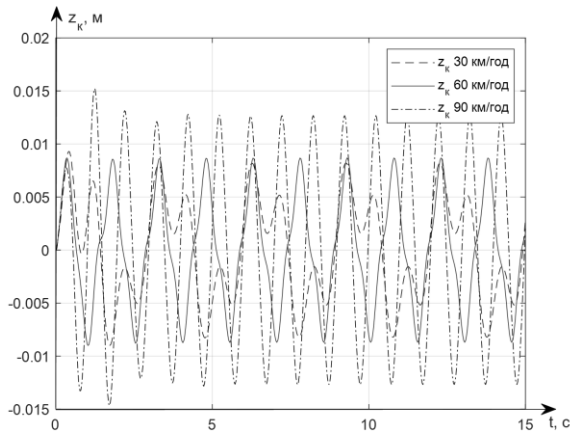


Рис. 6. Графіки підстрибування кузова вагона

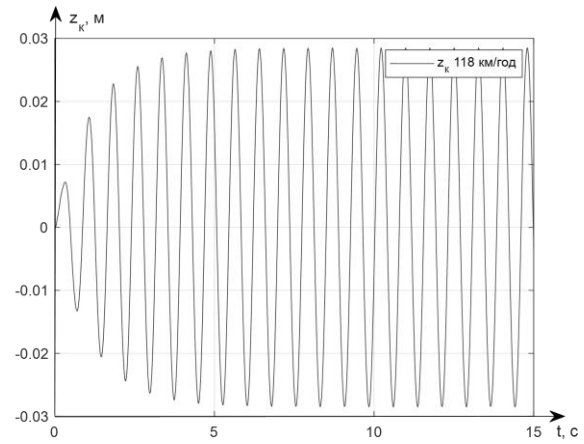


Рис.8. Графік підстрибування вагона на швидкості 118 км/год

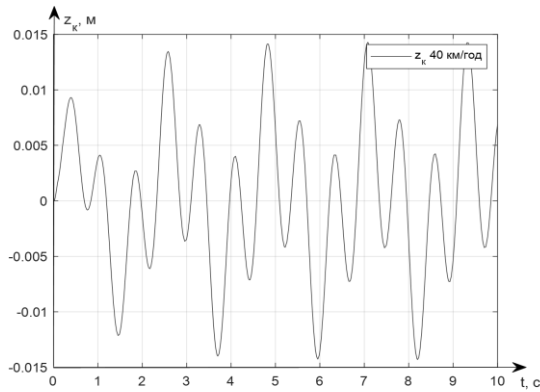


Рис. 7. Графік підстрибування вагона на швидкості 40 км/год

Промодельємо коливання вагона під час його руху перегонном, що має стикову нерівність. На рис. 9 представлені результати моделювання розгону до 130 км/год, підтримання швидкості, вибігу та гальмування та відповідних позицій контролера машиніста (N_{KM}) та гальмівного контролера машиніста ($N_{ГKM}$) на ділянці шляху, які отримані за допомогою блоку «Задання швидкості».

Графіки підстрибування кузова та візків вагона наведені на рис. 10. Спостерігається підвищення амплітуди коливань підстрибування кузова, які мають найбільші значення за швидкостей 40 та 118 км/год. Частоти підстрибування візків також підвищуються із підвищенням швидкості.

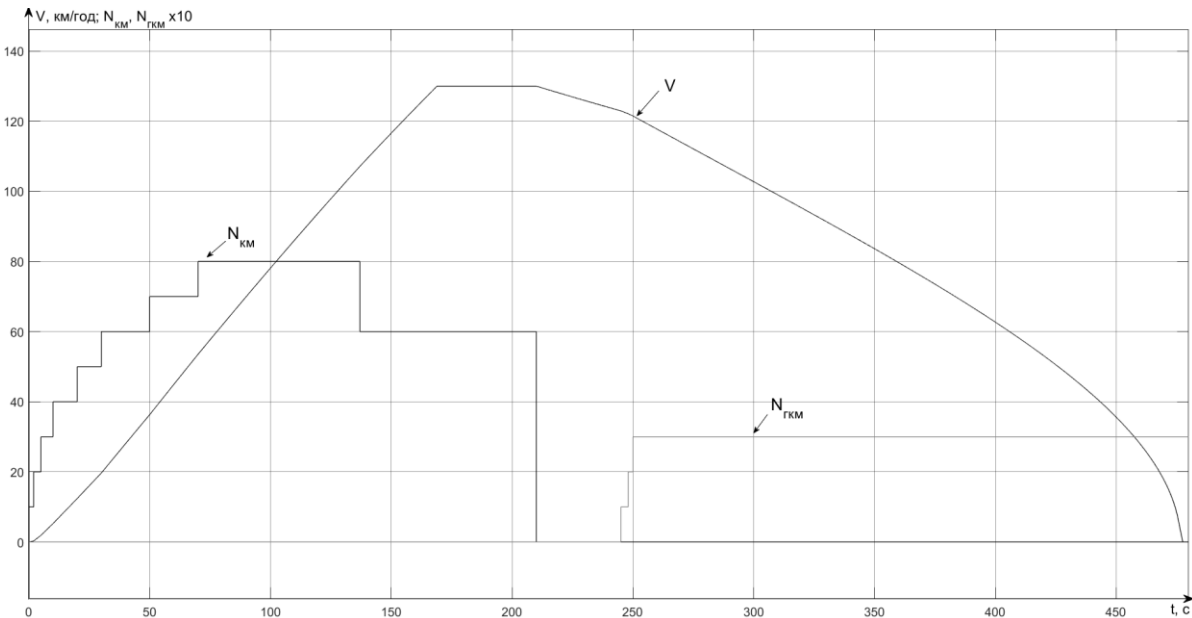


Рис. 9. Результати моделювання швидкості на ділянці шляху

На рис. 11 наведено графіки кута галопування кузова та візків вагона. Частоти цих коливань збільшуються зі збільшенням швидкості. Амплітуди коливань галопування приймають найбільші значення за швидкості 80 км/год.

Результати моделювання зі змінною швидкістю підтверджують результати, отримані за допомогою

використання сталої швидкості. Отже, отримана імітаційна модель може бути використані для подальшого проведення на ній досліджень коливальних процесів поїзда на обраних ділянках шляху, а також для отримання на ній даних для тренування нейронної мережі для раннього визначення резонансних коливань вагона поїзда.

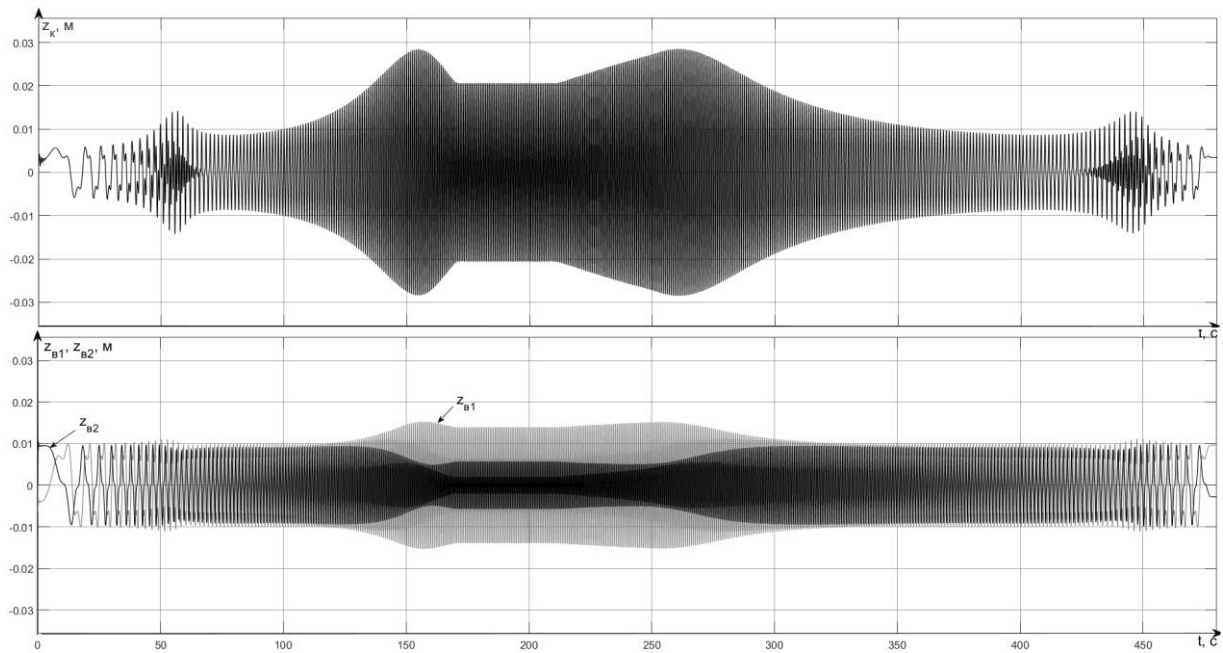


Рис. 10. Графіки підстрибування кузова та візків вагона поїзда

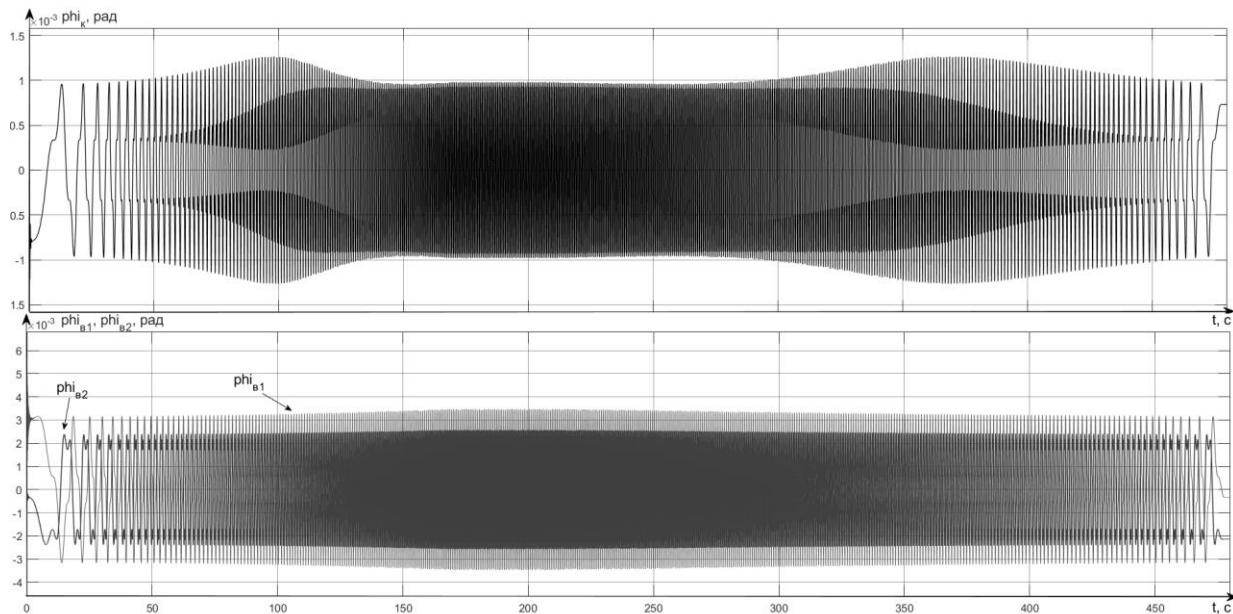


Рис. 11. Графіки підстрибування кузова та візків вагона поїзда

Висновки

У статті підкреслено необхідність досліджень, які направлені на зменшення зношення рейок та рухомого складу залізниць, а також підвищення швидкості руху та комфорту перевезення пасажирів. Розглянуто важливість урахування вертикальних коливань поїзда та причини їх виникнення.

Авторами запропоновано комплексну імітаційну модель руху вагона поїзда перегонном з урахуванням вертикальних коливань кузова вагона та його візків у пакеті MATLAB Simulink, яка дозволяє досліджувати залежність цих коливань від швидкості рухомого складу, параметрів його системи підвищення та нерівностей рейкового шляху під колісними парами не тільки в режимі підтримки заданої

швидкості, а й у режимі вибігу та перехідних режимах (розгоні, гальмуванні).

У результаті моделювання руху вагона з заданими параметрами було виявлено наявність резонансних вертикальних коливань підстрибування у кузова та першого візка вагона на швидкостях 40 та 118 км/год, а також резонансних коливань галопування кузова на швидкості 80 км/год.

Отримана імітаційна модель може бути використана для подальшого проведення на ній досліджень коливальних процесів поїзда на обраних ділянках шляху, а також для отримання на ній даних для тренування нейронної мережі для раннього визначення резонансних коливань вагона поїзда. Розроблена модель може бути використана у СППР бортових систем керування рухомого складу поїздів України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Інформаційне агентство УНІАН. Мінінфраструктури про стан потягів "УЗ": на 90% – металобрухт URL: <https://www.unian.ua/economics/transport/metalobruht-u-mininfrastrukturi-vislovilisya-pro-stan-potyagiv-uz-novini-ukrajina-11603764.html>
2. Каюкін В. О. Управління конкурентноспроможністю пасажирських перевезень залізничним транспортом в Україні: Проблеми та аналіз. Молодий вчений, 10 (62), 707-711. <https://molodyvchenyi.ua/index.php/journal/article/view/3871>
3. Lin, J.; Wang, K.; Zhai, W. Impact vibration behavior of railway vehicles: A state-of-the-art overview. Acta Mech. Sin. 2021, 37, 1193–1221.
4. Сокол Э. Н. Крушение железнодорожных поездов (Судебная экспертиза). Монография. – К.: Феникс, 2007. – 355 с.
5. Заковоротный А. Ю. Синтез автоматизированной системы управления подвижным составом на основе геометрической теории управления и нейронных сетей: дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.13.07 Нац. техн. ун-т "Харьков. политехн. ин-т". – Харьков, 2017. – 433 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/28330>
6. Костриця С. А. Математична модель вагона дизель-поїзда ДПКр-2 / С. А. Костриця, Ю. Г. Соболевська, А. Я. Кузишин, А. В. Батіг // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2018. – № 1 (73). – С. 15–25.
7. Кузишин А. Я. Удосконалення методів визначення основних динамічних показників моторвагонного рухомого складу на стадії проектування: дис. Доктор філософії : спец. 273 Залізничний транспорт : Дніпровський нац. ун-т. залізничного транспорту ім. ак. В.А. Лазаряна – Дніпро, 2019. – 144 с.
8. Garg, Vijay Kumar, and Rao V Dukkipati. Dynamics of Railway Vehicle Systems. New York: Academic Press, 1984.
9. João Pombo, Jorge A.C. Ambrósio, Miguel T. Silva. A new wheel-rail contact model for railway dynamic.Vehicle systems dynamics. – 2007. – P. 31-49.
10. Wang, X., Lu, Z., Wen, J. et al. Kinematics modelling and numerical investigation on the hunting oscillation of wheel–rail nonlinear geometric contact system. Nonlinear Dyn 107, 2075–2097 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11071-021-07103-w>
11. Sun J., Jiao W., Ur Rehman A. Hunting frequency variation mechanism and its effect on carbody hunting stability for railway vehicles. Acta Mech. Sin., Vol.39, 523046 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10409-023-23046-x>
12. Silva P., Mendes J., Seabra E, Pratas P. Railways Passenger Comfort/Discomfort: Objective Evaluation. New Research on Railway Engineering and Transportation, 2023. DOI: 10.5772/intechopen.111704
13. U.S. Department of Transportation. Federal Railroad Administration. Measuring the Displacement Environment between a Locomotive and Trailing Car. Final Report Report May 2020.
14. Лукашова Н. П. Підвищення ефективності роботи ходової частини рейкового міського транспорту з використанням електромеханічних амортизаторів: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.22.09 Електротранспорт: Харківський нац. ун-т міського господарства ім. О. М. Бекетова – Харків 2020 – 162 с.
15. Abood K. H. A., Khan R. A. Railway carriage simulation model to study the influence of vertical secondary suspension stiffness on ride comfort of railway carbody. Proc. IMechE Vol. 225 Part C: J. Mechanical Engineering Science, 2011 <https://doi.org/10.1177/0954406211399809>
16. Yokesh K. S., Nandakumar N. Modelling and Sensitivity Analysis of Influencing Parameters in Displacement of Dynamic Bodies. Engineering and Technology Journal, 2021, p. 879-883 DOI: 10.47191/etj/v6i5.02, I.F. – 6.39
17. Klimenda F., Skocilas J., Skocilasova B., Soukup J., Cizek R. Vertical Oscillation of Railway Vehicle Chassis with Asymmetry Effect Consideration. Sensors 2022, 22, 4033. <https://doi.org/10.3390/s22114033>
18. Yu Y., Zhao L., Zhou C. A new vertical dynamic model for railway vehicle with passenger-train-track coupling vibration. Proc IMechE Part K: J Multi-body Dynamics 2020, Vol. 234(1) p. 134–146. DOI: 10.1177/1464419319879790
19. Кудрявцев Н. Н., Белоусов В. П., Бурчак Г. П. Определение вертикальных возмущений, вызывающих колебания обрессоренных частей вагона при движении по рельсовому пути // Вестник ВНИИЖТ. 1982. № 5. С. 33–37
20. 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. Том 4 № 78, 2024, с. 42–45 <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.042>

Received (Надійшла) 11.12.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 05.03.2025

Modelling of vertical oscillations of a train arising during movement on a railway track with a joint unevenness

Polina Reshetnikova, Oleksandr Zakovorotnyi

Abstract. Rail transport has been one of the main carriers of goods and passengers in Ukraine for many years. Despite this, most trains and rails on the main routes are in poor condition. In the context of the ongoing war and the subsequent long post-war recovery, the issues of extending the life of existing rolling stock and saving energy resources are at the forefront. In addition, to maintain the competitiveness of trains relative to other modes of transport, the issue of increasing average speeds and passenger comfort on the railway is crucial. To solve these problems, it is necessary to develop comprehensive models that take into account factors that significantly affect fuel consumption, safety and passenger comfort. Such factors include rolling stock oscillations. This paper is devoted to the development of a simulation model of vertical oscillations (bouncing and galloping) of the body and bogies of a train carriage, which depend on unevenness of the railway track. The developed complex simulation model of train car movement on a track, taking into account vertical oscillations of the car body and its bogies in the MATLAB/Simulink package, allows to study the dependence of these oscillations on the speed of the rolling stock, parameters of its suspension system and unevenness of the track under the wheel pairs not only in the mode of maintaining a given speed, but also in the run-up mode and transient modes (acceleration, deceleration). The obtained simulation model can be used to further study the oscillatory processes of a train on selected sections of the track, as well as to obtain data for training a neural network for early detection of resonant vibrations of a train car, and can also be used in decision support systems (DSS) of on-board control systems for rolling stock of Ukrainian trains.

Keywords: mathematical model, decision support system, on-board control systems, rolling stock, oscillatory process, bouncing, galloping, resonant speed.