

УДК 629.42.015

В. А. ТАТАРІНОВА^{1*}, Я. КАЛІВОДА^{2*}, Л. О. НЕДУЖА^{3*}

^{1*}Каф. «Теоретична та будівельна механіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 728 36 99, ел. пошта Valentina100vol@gmail.com, ORCID 0000-0001-6484-3777

^{2*}Каф. «Автомобілі, двигуни внутрішнього згоряння та залізничний транспорт», Чеський технічний університет, вул. Технічна, 4, Прага, 6, Чехія, 16607, тел. +(420) 224 352 493, ел. пошта jan.kalivoda@fs.cvut.cz, ORCID 0000-0002-0278-2515

^{3*}Каф. «Теоретична та будівельна механіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 810 51 65, ел. пошта nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ЛОКОМОТИВА

Мета. Основною метою роботи є порівняння й підтвердження результатів теоретичних досліджень руху локомотива по прямолінійним та криволінійним ділянкам колії у встановленому діапазоні експлуатаційних швидкостей, що є головним для визначення їх динамічних якостей. Проведений комплекс досліджень є однією з передумов поліпшення динамічних якостей механічної частини рухомого складу, зокрема параметрів ходової частини. **Методика.** Дослідження проведені методом чисельного інтегрування динамічної навантаженості залізничного транспортного засобу з використанням одного із сучасних програмних комплексів. У роботі застосовано математичну модель просторових коливань локомотива, отриманих за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду. **Результати.** Проведено теоретичні дослідження й виконано аналіз поведінки транспортного засобу під час руху по ділянці колії, яка у вертикальній площині не має геометричних дефектів, та з урахуванням нерівностей на прикладі магістрального локомотива. Дослідження проведено як аналітично, так і за допомогою сучасного програмного комплексу. Порівняння графіків показує, що результати, отримані різними методами, збігаються з достатньою точністю. **Наукова новизна.** За результатами багаторічної роботи автори представили загальну класифікацію механічної частини локомотивів, що може стати в нагоді науковцям, які досліджують динамічні якості нових і модернізованих засобів рейкового рухомого складу. **Практична значимість.** Застосовано новий ліцензований сучасний програмний комплекс, який можна використовувати під час проектування, моделювання одиниць рухомого складу та їх елементів під час проведення теоретичних й експериментальних досліджень, порівняння їх результатів. Результати теоретичних досліджень можуть бути враховані для проведення попередніх досліджень під час створення надійних конструкцій нового транспортного засобу, подальшого поліпшення механічної частини, модернізації одиниць рухомого складу, під час проведення натурних випробувань.

Ключові слова: транспортний засіб; рухомий склад; локомотив; механічна частина; візок; програмний комплекс

Вступ

Конструкції тягового рухомого складу нового покоління дозволяють забезпечувати його високі експлуатаційні якості: знижувати енерговитрати на тягу; зменшувати вплив на колію за заданого навантаження від осі колісної пари на рейки; поліпшувати умови роботи локомотивних бригад і комфортність пасажирів; знижувати рівень викидів шкідливих речовин в атмосферу та ін. [10, 18, 19, 21].

Як відомо з історії залізничного транспорту, механічна частина перших локомотивів склада-

лася з кузова, колісних пар із підшипниковими вузлами, тягового приводу, упряжних пристроїв, гальм (рис. 1, а), із часом конструкція механічної частини неодноразово змінювалася – її особливості залежали від зміни вимог до тягового рухомого складу, збільшення конструкційної швидкості, призначення локомотива, виду руху, необхідності врахування зростаючого попиту споживачів та багатьох інших факторів [3, 5, 7, 9, 10, 21–24]. Завдяки досягненням сучасного машинобудування й розвитку науково-технічного прогресу основні вузли механічної частини перших локомотивів отримали суттєве вдосконалення (рис. 1, б, в), і виробники

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

залізничної техніки не зупиняються на досягнутих результатах [8, 10]. Сучасні локомотиви мають, як правило, поворотні візки з однією або двома ступенями ресорного підвищення (пружні й дисипативні елементи), вузли спирання кузова на візки, елементи пере-

дачі поздовжніх сил між візком і кузовом, квазіпружні поперечні зв'язки між ними, поворотні пристрої та пристрої для рівномірного розподілу вертикальних навантажень між колісними парами (рис. 1, в).

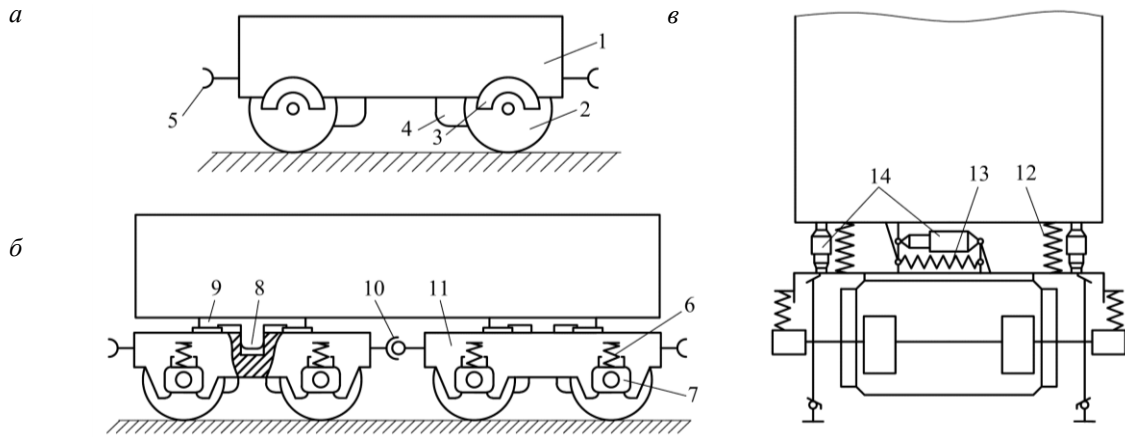


Рис. 1. Еволюція механічної частини локомотива:

- а* – механічна частина перших локомотивів:
 1 – кузов; 2 – колісна пара; 3 – підшипниковий вузол; 4 – тяговий привід; 5 – упряжні пристрої й гальма;
б – удосконалена конструкція механічної частини:
 6 – пружні елементи; 7 – буксовий вузол; 8 – поворотні пристрої; 9 – опорні вузли кузова;
 10 – пристрої зчленування візків; 11 – рама візка;
в – конструкція механічної частини сучасних локомотивів:
 12 – кузовна ступінь ресорного підвищення; 13 – квазіпружні пристрої поперечного зв'язку;
 14 – спеціальні пристрої

Мета

Основною метою роботи є порівняння й підтвердження результатів теоретичних досліджень руху локомотива по прямолінійним та криволінійним ділянкам колії у встановленому діапазоні експлуатаційних швидкостей, що є головним для визначення їх динамічних якостей. Проведений комплекс досліджень є однією з передумов поліпшення динамічних якостей механічної частини рухомого складу, зокрема параметрів ходової частини.

Методика

Дослідження проведені методом чисельного інтегрування динамічної завантаженості залізничного транспортного засобу з використанням одного із сучасних програмних комплексів. У роботі застосовано математичну модель просторових коливань локомотива, отриманих за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду.

Механічна частина рейкового рухомого

складу, на яку впливає вага всього устаткування, бере участь у передачі тягових зусиль від локомотива до поїзда, сприймає динамічні навантаження, що виникають під час руху по прямих і кривих ділянках колії. Тому для забезпечення її нормальної й безаварійної роботи необхідно, щоб:

- усі вузли механічної частини відповідали умовам міцності за найбільш несприятливого поєднання діючих навантажень;
- механічна частина була досить міцною, відповідала вимогам безпеки і правилам технічної експлуатації залізниць;
- механічна частина була простою й надійною конструкцією, особливо її ходова.

Тому на підставі аналізу конструкцій тягового рухомого складу [4, 8, 10, 12, 13, 15, 18, 19, 21], ідей, напрацьовань і досягнень локомотивобудування [1, 2, 5, 7, 8–10, 13, 17–19, 21], результатів численних досліджень [3, 5, 7, 9, 21–24] автори роботи, з точки зору системності, пропонують варіант загальної класифікації механічної частини локомотивів (рис. 2).

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Однією з необхідних умов якісного поліпшення тягового рухомого складу залізниць є визначення параметрів його ходових частин [2, 4, 8–10, 18, 19, 21, 23]. Тому, важливе місце займає задача визначення динамічних якостей локомотивів з урахуванням обраних технічних рішень у конструкції ходових частин, наприклад, наявність і розташування зв'язків між кузовом і візком, системи підвішування кузова, пристроїв передачі поздовжніх і поперечних сил та ін.

У нашій роботі проведені дослідження для магістрального електровоза серії ДС, який був створений у співпраці з концерном Siemens на Дніпропетровському електробудівному заводі (ДЕВЗ) за участю цілого ряду наукових і виробничих організацій, у тому числі й Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДНУЗТ) [10, 18, 19, 21]. Його ходові частини (рис. 3) виконані двовісними безшкворневими, з опорно-рамним підвішуванням тягових електродвигунів. Для передачі поздовжніх сил тяги (гальмування) між кожним візком і кузовом встановлена похила тяга, яка шарнірно з'єднана з тяговим пристроєм візка та з рівно-плечим балансиrom, кінці якого пов'язані зі стержнями за допомогою шарнірних підшипників [10, 13, 18, 19].

Як відомо, механічна частина локомотивів – складна система з великою кількістю тіл, що мають багато ступенів свободи.

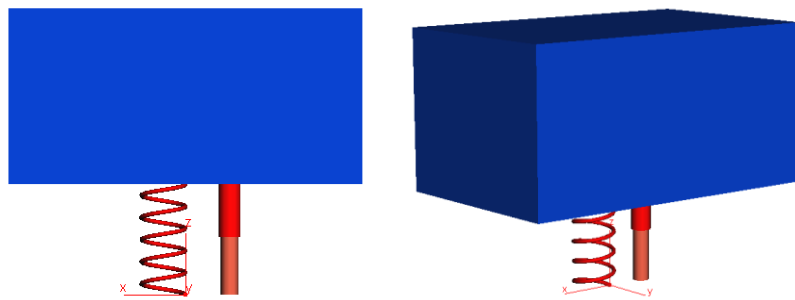
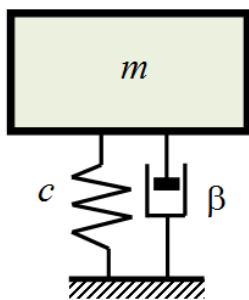


Рис. 4. Об'єкт дослідження без урахування нерівностей колії

Оскільки система має один ступінь вільності, то $n = 1$; за узагальнену координату обираємо переміщення тіла вздовж вертикальної осі $q_1 = y$; узагальнена швидкість $\dot{q}_1 = \dot{y}$.

Кінетичну енергію тіла, потенціальну енергію, яка накопичується в пружному елементі,

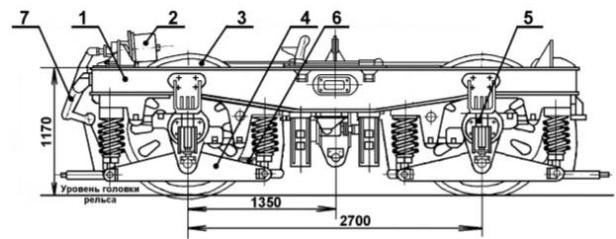


Рис. 3. Схема візка:

1 – рама візка; 2 – гальмівний циліндр;
3 – колісна пара; 4 – балансиr першої ступені ресорного підвішування; 5 – гідродемпфер; 6 – установка гребенезмашувачів; 7 – важільна гальмівна система

У цій статті описаний перший (спрощений) етап досліджень, розглянута найпростіша обчислювальна динамічна модель механічної частини, тобто одномасова система, ступінь вільності якої дорівнює одиниці, із параметрами наведеного об'єкта. Складемо рівняння Лагранжа другого роду коливань цієї системи. Нехай тіло (можливо, це кузов одиниці рухомого складу) маси m за допомогою пружного елемента й демпфера в'язкого опору прикріплено до колісної пари (масою якої поки що нехтуємо) і рухається по ділянці колії, яка у вертикальній площині не має геометричних дефектів (без урахування нерівностей колії) (рис. 4). Координатну вісь y , уздовж якої рухається тіло, спрямуємо донизу. Пружний елемент має жорсткість c , коефіцієнт в'язкого опору демпфера позначимо β . На рис. 4 показана розрахункова схема плоского й просторового зображення цієї конструкції.

функцію розсіювання енергії в демпфері в'язкого опору визначаємо за відомими формулами [2, 6, 11, 14].

Узагальнена сила, як відомо з теоретичної механіки, може мати дві складові частини: уза-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

гальнена сила, яка має потенціал $Q_i^{**} = -\frac{\partial \Pi}{\partial q_i}$, й

узагальнена сила, яка не має потенціалу Q_i^* .

Тобто $Q = Q_i^* + Q_i^{**}$. Оскільки на вантаж не діє збурювальна зовнішня сила, яка не має потенціалу, то відповідна узагальнена сила $Q_i^* = 0$.

Скориставшись рівняннями Лагранжа другого роду

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} = 0,$$

отримаємо рівняння руху тіла $m\ddot{q}_1 + \beta\dot{q}_1 + cq_1 = 0$, у канонічному вигляді воно буде таким

$$\ddot{q} + 2b\dot{q} + k^2 q = 0.$$

$$\text{Позначимо } b = \frac{\beta}{2m}, \quad k^2 = \frac{c}{m}.$$

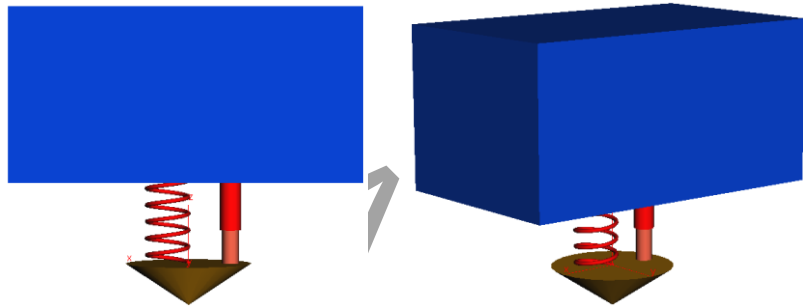
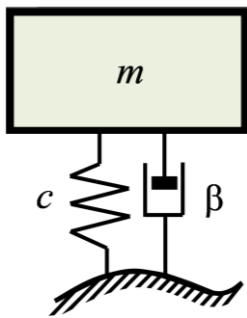


Рис. 5. Об'єкт дослідження з урахуванням нерівностей колії.

Тоді диференціальне рівняння руху тіла, яке отримане за допомогою рівняння Лагранжа другого роду, має вигляд [2, 6, 11, 14]:

$$m\ddot{q}_1 + \beta(\dot{q}_1 - \dot{\eta}) + c(q_1 - \eta) = 0,$$

або:

$$m\ddot{q}_1 + \beta\dot{q}_1 + cq_1 = \beta\dot{\eta} + c\eta.$$

Це рівняння можна переписати по-іншому:

$$m\ddot{q}_1 + \beta\dot{q}_1 + cq_1 = c\eta_0 \sin \omega t + \beta\omega\eta_0 \cos \omega t,$$

де η_0 – амплітудне значення деформації рейки, ω – частота синусоїдального збурення.

У цьому випадку розв'язок має вигляд:

Його розв'язок має вигляд [2, 3, 8, 13]:

$$q = e^{-bt} (A \cos k_1 t + B \sin k_1 t),$$

де $k_1 = \sqrt{k^2 - b^2}$, A, B – сталі інтегрування, які знаходять із початкових умов. Фізичний зміст: k_1 – частота коливань з урахуванням тертя; k – частота вільних коливань (без урахування тертя).

Розглянемо випадок, коли тіло маси m за допомогою пружного елемента й демпфера в'язкого опору прикріплено до колісної пари, масою якої поки що нехтуємо, рухається по колії, що у вертикальній площині має нерівність, яка задана рівнянням $\eta = \eta_0 \sin \omega t$. На рис. 5 показана розрахункова схема, плоске й просторове зображення цієї конструкції.

$q_1 = e^{-bt} (A \cos k_1 t + B \sin k_1 t) + D_1 \sin \omega t + D_2 \cos \omega t$, де D_1, D_2 – сталі інтегрування, що задовольняють правій частині.

Результати

Приклад 1. Розглянемо реальну механічну систему електровоза ДСЗ як одномасову систему, яка рухається по ділянці колії, яка у вертикальній площині не має геометричних дефектів (без урахування нерівностей) (див. рис. 4).

Параметри системи:

$$c = 2950 \frac{\text{кН}}{\text{м}}, \quad m = 50 \text{ т}, \quad \beta = 180 \frac{\text{кН} \cdot \text{с}}{\text{м}},$$

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$k^2 = \frac{c}{m} = \frac{2950}{50} = 59, \quad k = \sqrt{59} = 7,68 \text{ с}^{-1},$$

$$b = \frac{\beta}{2m} = \frac{180}{100} = 1,8 \text{ с}^{-1},$$

$$k_1 = \sqrt{59 - 3,24} = 7,47 \text{ с}^{-1}.$$

З початкових умов $q_0 = 25 \cdot 10^{-3} = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $\dot{q}_0 = 0$ знайдемо $A = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $B = 6,02 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Тоді кінцевий результат задачі має вигляд:

$$q = e^{-1,8t} (2,5 \cdot \cos 7,47t + 0,602 \cdot \sin 7,47t) \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Графік зміни цієї координати, отриманий за аналітичними розрахунками та за допомогою програмного комплексу, показано на рис. 6 і рис. 9 відповідно.

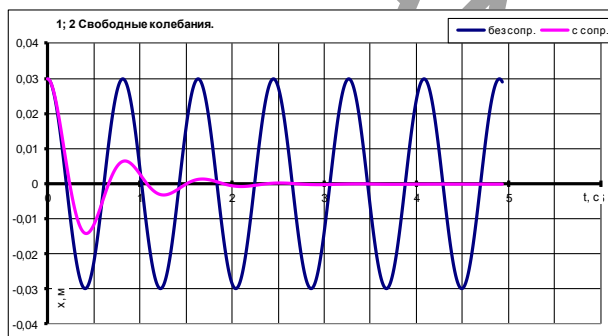


Рис. 6. Графік вільних коливань за аналітичним розрахунком

Оскільки конструкторів цікавлять сили, що виникають у пружних елементах, знайдемо прискорення тіла:

$$\ddot{q} = -3,24 \cdot e^{-1,8t} (2,5 \cdot \cos 7,47t + 0,602 \cdot \sin 7,47t) - 3,6 \cdot e^{-1,8t} (-18,68 \cdot \sin 7,47t + 4,50 \cdot \cos 7,47t) + e^{-1,8t} (-139,50 \cdot \cos 7,47t - 33,60 \cdot \sin 7,47t) \left(\frac{\text{см}}{\text{с}^2} \right).$$

Приклад 2. Результати руху того ж екіпажу (за тих самих умов і значень параметрів) по колії, яка у вертикальній площині має нерівність, наведено на (рис. 7).

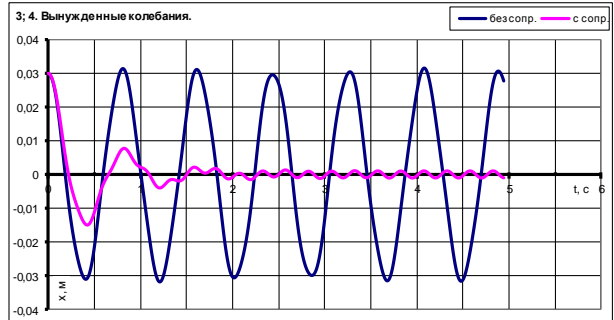


Рис. 7. Графік вимушених коливань за аналітичним розрахунком

Приклад 3. Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) того ж екіпажу показує співвідношення амплітуди відхилення тіла маси m й амплітуди нерівностей колії залежно від частоти її нерівностей.

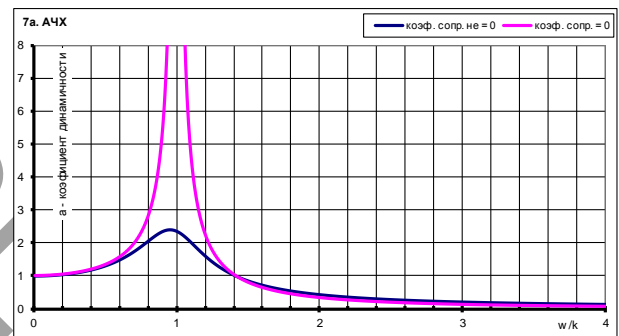


Рис. 8. Графік амплітудно-частотної характеристики за аналітичним розрахунком

Результати, отримані за допомогою сучасного програмного комплексу [17, 20], на рис. 9–11 відповідно.

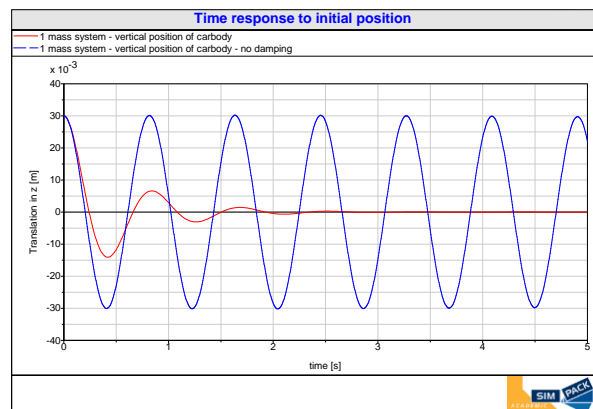


Рис. 9. Графік вільних коливань, отриманий за допомогою сучасного програмного комплексу

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

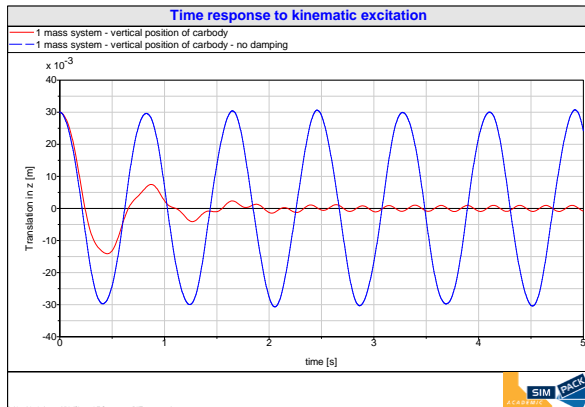


Рис. 10. Результати отримані за допомогою сучасного програмного комплексу – вимушені коливання

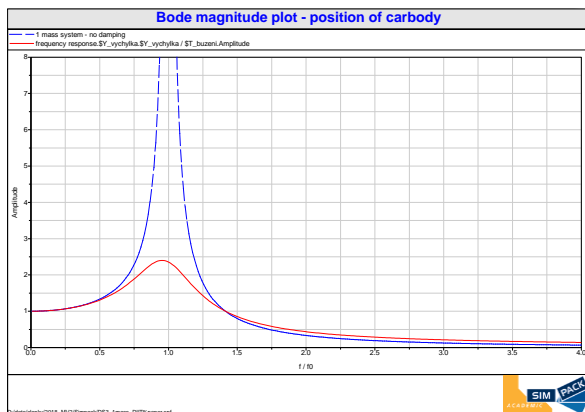


Рис. 11. Графік амплітудно-частотної характеристики, отриманий за допомогою програмного комплексу

Порівняння цих графіків засвідчує, що ми маємо однакові результати в обох випадках. Але, на відміну від аналітичного рішення, ми можемо досягти цих результатів легше за допомогою програмного комплексу.

Програмний комплекс автоматично створює рівняння руху, знаходить рішення та відображає результати. Цю перевагу можна використовувати для аналізу руху складних моделей з багатьма ступенями свободи (рис. 12).

Без використання сучасного програмного комплексу створення такої моделі буде надто складним і трудомістким. Сучасні програмні комплекси дозволяють створити та розрахувати таку модель протягом декількох днів.

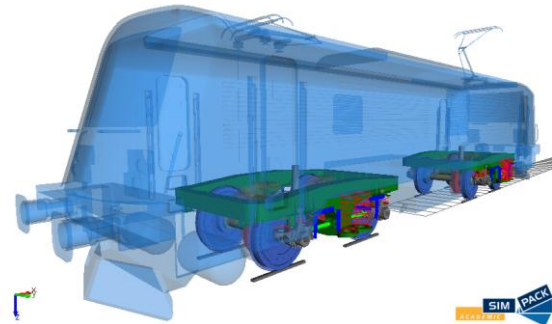


Рис. 12. Просторова нелінійна модель електровоза з 124 ступенями свободи

Наукова новизна та практична значимість

За результатами проведеної багаторічної роботи автори подали загальну класифікацію механічної частини локомотивів, що може стати в нагоді науковцям, які досліджують динамічні якості нових та модернізованих засобів рейкового рухомого складу.

Застосовано новий ліцензований сучасний програмний комплекс, який можна використовувати під час проектування, моделювання одиниць рухомого складу та їх елементів; для проведення теоретичних та експериментальних досліджень, порівняння їх результатів.

Результати теоретичних досліджень можуть бути враховані для проведення попередніх досліджень під час створення надійних конструкцій нового транспортного засобу, подальшого поліпшення механічної частини, модернізації одиниць рухомого складу, під час проведення натурних випробувань.

Висновки

Під час створення й удосконалення конструкцій рухомого складу актуальним є узагальнення теоретичних, науково-методичних, експериментальних досліджень, які спрямовані на поліпшення якостей транспортного засобу в цілому й механічної частини локомотива зокрема.

У роботі проаналізовано поведінку транспортного засобу під час руху по ділянці колії, яка у вертикальній площині не має геометричних дефектів, та з урахуванням нерівностей на прикладі магістрального локомотива. Дослідження проведено як аналітично, так і за допомогою сучасного програмного комплексу.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Порівняння графіків (рис. 6–8 та рис. 9–11) показує, що результати, отримані різними методами, збігаються з достатньою точністю.

Застосування сучасних обчислювальних засобів дозволяє легше й швидше отримувати результати, ніж за допомогою аналітичних методів.

Використання наведених результатів теоретичних досліджень може дати змогу водночас збільшити конструкційну швидкість, забезпечити необхідні динамічні показники залізничного транспортного засобу, зменшити його вплив на колію, підвищити рівень безпеки руху поїздів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Басов, Г. Г. Теоретичні й експериментальні дослідження екіпажної частини тепловозів : навч. посіб. / Г. Г. Басов, В. І. Нестеренко. – Луганськ : Ноулідж, 2011. – 247 с.
2. Блохін, Є. П. Динаміка електричного рухомого складу : навч. посіб. / Є. П. Блохін, М. Л. Коротенко, В. С. Буров. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2002. – 138 с.
3. Бондаренко, І. О. Моделювання з метою встановлення оціночних умов функціональної безпеки залізничної колії / І. О. Бондаренко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – Т. 1, № 7 (79). – С. 4–10. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59874
4. Евстратов, А. С. Экипажные части тепловозов / А. С. Евстратов. – Москва : Машиностроение, 1987. – 136 с.
5. Кузишин, А. Я. Побудова механічної моделі вагона дизель-поїзда ДПКр-2 та її особливості / А. Я. Кузишин, А. В. Батіг // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 6 (72). – С. 20–29. doi: 10.15802/stp2017/117936
6. Лазарян, В. А. Устойчивость движения рельсовых экипажей / В. А. Лазарян, Л. А. Длугач, М. Л. Коротенко. – Киев : Наук. думка, 1972. – 197 с.
7. Математична модель вагона дизель-поїзда ДПКр-2 / С. А. Костриця, Ю. Г. Соболевська, А. Я. Кузишин, А. В. Батіг // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 1 (73). – С. 56–65. doi: 10.15802/stp2018/123079
8. Механическая часть тягового подвижного состава : учебник для вузов / под ред. И. В. Бирюкова. – Москва : Транспорт, 1992. – 440 с.
9. Мурадян, Л. А. К вопросу о планах испытаний надежности механических систем / Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник // Зб. наук. пр. Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків, 2015. – Вип. 157. – С. 119–128.
10. Мямлин, С. В. Особенности конструкции ходовых частей тягового подвижного состава / С. В. Мямлин, О. Лунис, Л. А. Недужая // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 3 (69). – С. 130–146. doi: 10.15802/stp2017/104824
11. Павловський, М. А. Теоретична механіка / М. А. Павловський. – Київ : Техніка, 2002. – 510 с.
12. Повышение надежности экипажной части тепловозов / под ред. Л. К. Добрынина. – Москва : Транспорт, 1984. – 248 с.
13. Соколов, Ю. Н. Конспект для локомотивных бригад. Электровоз ДСЗ. Устройство, управление, обслуживание / Ю. Н. Соколов. – Киев : Изд-во Юго-Запад. ж.-д., 2011. – 299 с.
14. Теоретична механіка : навч. посіб. / В. І. Векерик, Д. І. Ільчишина, К. Г. Левчук, І. В. Цідило, Л. М. Шальда – Івано-Франківськ : Факел, 2006. – 459 с.
15. Тепловозы: Основы теории и конструкция / под ред. В. Д. Кузьмича. – Москва : Транспорт, 1991. – 352 с.
16. Трофимович, В. В. Механическая часть электроподвижного состава : курс лекций : в 2 ч. / В. В. Трофимович. – Хабаровск : Изд-во Дальневост. гос. ун-та путей сообщения, 2006. – Ч. 2. – 100 с.
17. Kalivoda, J. Enhancing the scientific level of engineering training of railway transport professionals / J. Kalivoda, L. O. Neduzha // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 6 (72). – С. 128–137. doi: 10.15802/stp2017/119050
18. Klimenko, I. Parameter Optimization of the Locomotive Running Gear / I. Klimenko, J. Kalivoda, L. Neduzha // Proc. of 22nd Intern. Sci. Conf. (October 3–5, 2018) / Kaunas University of Technology. – Trakai ; Klaipėda, 2018. – P. 1095–1098.
19. Mathematical Simulation of Spatial Oscillations of the «Underframe-Track» System Interaction / I. Klimenko, L. Černiauskaite, L. Neduzha, O. Ochkasov // Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- ITELMS'2018 : Proc. of 12th Intern. Conf. (April 26–27, 2018, Panevėžys) / Kaunas University of Technology. – Kaunas, 2018. – P. 105–114.
20. Multy-Body Simulation Software [Електроний ресурс] // SIMULIA Simpack. – Available at: <http://www.simpack.com> – Title from the screen. – Accessed : 31.10.2018.
21. Myamlin, S. Research of Innovations of Diesel Locomotives and Bogies / S. Myamlin, L. Neduzha, Ž. Urbutis // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 134. – P. 469–474. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.069
22. Nestacionarieji ir Kvazistatiniai Gelezinkelio Traukinių Judejimo Rezimai : monografija / E. Blochinas, S. Dailydka, L. Lingaitis, L. Ursuliak ; Vilniaus Gedimino Technicos Universitetas. – Vilnius : Technika, 2015. – 167 p. doi: 10.3846/2321-m
23. Serdiuk, T. M. Modeling of influence of traction power supply system on railway automatics devices / T. M. Serdiuk // 2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE (4-7 Sept. 2017). – Angers, France, 2017. doi: 1109/EMCEurope.2017.8094637
24. Shykunov, O. A. Three-element bogie side frame strength / O. A. Shykunov // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 1 (67). – С. 183–193. doi: 10.15802/stp2017/92535

В. А. ТАТАРИНОВА^{1*}, Я. КАЛИВОДА^{2*}, Л. А. НЕДУЖА^{3*}

^{1*}Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (097) 728 36 99, эл. почта Valentina100vol@gmail.com, ORCID 0000-0001-6484-3777

^{2*}Каф. «Автомобили, двигатели внутреннего сгорания и железнодорожный транспорт», Чешский технический университет, ул. Техническая, 4, Прага, 6, Чехия, 16607, тел. +(420) 224 352 493, эл. почта jan.kalivoda@fs.cvut.cz, ORCID 0000-0002-0278-2515

^{3*}Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (067) 810 51 65, эл. почта nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЛОКОМОТИВА

Цель. Основной целью работы является сравнение и подтверждение результатов теоретических исследований движения локомотива по прямолинейным и криволинейным участкам пути в установленном диапазоне эксплуатационных скоростей, что является главным для определения их динамических качеств. Проведенный комплекс исследований является одним из условий улучшения динамических качеств механической части подвижного состава, в частности параметров ходовой части. **Методика.** Исследования проведены методом численного интегрирования динамической нагруженности железнодорожного транспортного средства с использованием одного из современных программных комплексов. В работе применена математическая модель пространственных колебаний локомотива, полученных с помощью уравнений Лагранжа второго рода. **Результаты.** Проведены теоретические исследования и выполнен анализ поведения транспортного средства во время движения по участку пути, который в вертикальной плоскости не имеет геометрических дефектов, и с учетом неровностей на примере магистрального локомотива. Исследование проведено как аналитически, так и с помощью современного программного комплекса. Сравнение графиков показывает, что результаты, полученные разными методами, совпадают с достаточной точностью. **Научная новизна.** По результатам многолетней работы авторы представили общую классификацию механической части локомотивов, которая может пригодиться ученым, исследующим динамические качества новых и модернизированных средств рельсового подвижного состава. **Практическая значимость.** Применен новый лицензированный современный программный комплекс, который можно использовать при проектировании, моделировании единиц подвижного состава и их элементов при проведении теоретических и экспериментальных исследований, сравнения их результатов. Результаты теоретических исследований могут быть учтены для проведения предварительных исследований при создании надежных конструкций нового транспортного средства, дальнейшего улучшения механической части, модернизации единиц подвижного состава, во время проведения натурных испытаний.

Ключевые слова: транспортное средство; подвижной состав; локомотив; механическая часть; тележка; программный комплекс

V. A. TATARINOVA^{1*}, J. KALIVODA^{2*}, L. O. NEDUZHA^{3*}

^{1*}Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 728 36 99, e-mail Valentina100vol@gmail.com, ORCID 0000-0001-6484-3777

^{2*}Dep. «Automobiles, Internal Combustion Engines and Railway Vehicles», Czech Technical University, Technicka St., 4, Prague 6, Czech Republic, 16607, tel. +(420) 224 352 493, e-mail jan.kalivoda@fs.cvut.cz, ORCID 0000-0002-0278-2515

^{3*}Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 810 51 65, e-mail nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

RESEARCH OF LOCOMOTIVE MECHANICS BEHAVIOR

Purpose. The main purpose of the study is to compare and confirm the results of theoretical studies of locomotive motion along the straight and curved track sections in the set range of operating speeds, which is essential for determining their dynamic qualities. The conducted research complex is one of the prerequisites for improving the reliability of the rolling stock mechanics, in particular the bogie parameters. **Methodology.** The research was carried out by numerical integration of the dynamic loading of a railway vehicle using one of the modern software complexes. In this study we used the mathematical model of locomotive spatial oscillations obtained using Lagrangian equations of the second kind. **Findings.** Authors carried out theoretical research and performed the analysis of the vehicle behavior during the motion along the track section, which in the vertical plane has no geometric defects, and taking into account the inequalities on the example of the main locomotive. The researches were carried out both analytically and with the help of the modern software complex. Comparison of the graphs shows that the results obtained by different methods coincide with sufficient accuracy. **Originality.** Based on the results of many years of work, the authors present the General Classification of Locomotive Mechanics, which may be useful to researchers, who are involved in the assessment of the dynamic qualities of new and upgraded types of rolling stock. **Practical value.** A new licensed modern software complex has been applied, which makes it possible to use it in the design, modeling of units of rolling stock and their elements; during theoretical and experimental studies, comparison of their results. The results of theoretical research can be taken into account for the preliminary research during creating the reliable constructions of a new vehicle, further improvement of the mechanics, modernization of the existing units of rolling stock during field tests.

Keywords: vehicle; rolling stock; locomotive; vehicle mechanics; bogie; software complex

REFERENCES

1. Basov, H. H., & Nesterenko, V. I. (2011). *Teoretychni y eksperymentalni doslidzhennia ekipazhnoi chastyny teplovoziv: Navchalnyi posibnyk*. Lughansk, Noulidzh. (in Ukrainian)
2. Blokhin, Y. P., Korotenko, M. L., & Burov, V. S. (2002). *Dynamika elektrychnoho rukhomoho skladu: Navchalnyi posibnyk*. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Ukrainian)
3. Bondarenko, I. O. (2016). Modeling for establishment of evaluation conditions of functional safety of the railway track. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/7(79), 4-10. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59874 (in Ukrainian)
4. Yevstratov, A. S. (1987). *Ekipazhnye chasti teplovozov*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
5. Kuzyshyn, A. Y., & Batig, A. V. (2017). Construction of Mechanical Model of the Diesel-Train DTKr-2 Car and its Features. *Science and Transport Progress*, 6(72), 20-29. doi: 10.15802/stp2017/117936 (in Ukrainian)
6. Lazarian, V. A., Dluhach, L. A., & Korotenko, M. L. (1972). *Ustoychivost dvizheniya relsovykh ekipazhey*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
7. Kostritsa, S. A., Sobolevska, Y. H., Kuzyshyn, A. Y., & Batih, A. V. (2018). Mathematical Model of Dpkr-2 dyzel Train Car. *Science and Transport Progress*, 1(73), 56-65. doi: 10.15802/stp2018/123079 (in Ukrainian)
8. Biryukov, I. V. (Ed). (1992). *Mekhanicheskaya chast tyagovogo podvizhnogo sostava: Uchebnik dlya vuzov*. Moscow: Transport. (in Russian)
9. Muradyan, L. A., Shaposhnik, V. Y. (2015). K voprosu o planakh ispytaniy nadezhnosti mekhanicheskikh sistem. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, 157, 119-128. (in Russian)

10. Myamlin, S. V., Lunys, O., & Neduzha, L. O. (2017). Peculiarities of Running Gear Construction of Rolling Stock. *Science and Transport Progress*, 3(69), 130-146. doi: 10.15802/stp2017/104824 (in Russian)
11. Pavlovskiy, M. A. (2002). *Teoretychna mekhanika*. Kyiv: Tekhnika. (in Ukrainian)
12. Dobrynin, L. K. (Ed). (1984). *Povyshenie nadezhnosti ekipazhnoy chasti teplovozov*. Moscow: Transport. (in Russian)
13. Sokolov, Y. N. (2011). *Konspekt dlya lokomotivnykh brigad. Elektrovoz DS3. Ustroystvo, upravlenie, obsluzhivanie*. Kyiv: Izdatelstvo Yugo-Zapadnoy zheleznoy dorogi. (in Russian)
14. Vekeryk, V. I., Ilchyshyna, D. I., Levchuk, K. H., Tsidylo, I. V., & Shalda, L. M. (2006). *Teoretychna mekhanika*. Ivano-Frankivsk: Fakel. (in Ukrainian)
15. Kuzmich, V. D. (Ed). (1991). *Teplovozy: Osnovy teorii i konstruktsiya*. Moscow: Transport. (in Russian)
16. Trofimovich, V. V. (2006). *Mekhanicheskaya chast elektropodvizhnogo sostava: Kurs lektsiy* (Vol. 1-2). Khabarovsk: Izdatelstvo Dalnevostochnogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. (in Russian)
17. Kalivoda, J., & Neduzha, L. O. (2017). Enhancing the Scientific Level of Engineering Training of Railway Transport Professionals. *Science and Transport Progress*, 6(72), 128-137. doi: 10.15802/stp2017/119050 (in English)
18. Klimenko, I., Kalivoda, J., & Neduzha, L. (2018). Parameter Optimization of the Locomotive Running Gear: *Proceedings of 22nd International Scientific Conference (October 3–5, 2018)*. Trakai, Klaipėda. (in English)
19. Klimenko, I., Černiauskaitė, L., Neduzha, L. & Ochkasov, O. (2018). Mathematical Simulation of Spatial Oscillations of the «Underframe-Track» System Interaction. *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems – ITELMS'2018: Proc. of 12th Intern. Conf. (April 26–27, 2018, Panevėžys)*. Kaunas. (in English)
20. Multy-Body Simulation Software. *SIMULIA Simpack*. Retrived from <http://www.simpack.com> (in English)
21. Myamlin, S., Neduzha, L., & Urbutis, Ž. (2016). Research of Innovations of Diesel Locomotives and Bogies. *Procedia Engineering*, 134, 469-474. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.069 (in English)
22. Blochinas, E., Dailydka, S., Lingaitis, L. P., & Ursuliak, L. (2015). *Nestacionarieji ir kvazistatiniai geležinkelio traukinių judėjimo režimai: monografija*. Vilnius: Technika. doi: 10.3846/2321-m (in Lithuanian)
23. Serdiuk, T. M. (2017). Modeling of influence of traction power supply system on railway automatics devices. *2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE*. doi: 10.1109/emceurope.2017.8094637 (in English)
24. Shykunov, O. A. (2017). Three-element Bogie Side Frame Strength. *Science and Transport Progress*, 1(67), 183-193. doi: 10.15802/stp2017/92535 (in English)

Надійшла до редколегії: 04.06.2018

Прийнята до друку: 08.10.2018

Рис. 2. Загальна класифікація механічної частини локомотивів

TRANSLATION