

DOI 10.36074/logos-31.10.2025.024

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ШАРУ ГУМОВИХ АМОРТИЗАТОРІВ НА АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПІДЛОГИ ВАГОНА ЕЛЕКТРОПОЇЗДА

Головащенко Олег Анатолійович¹, Сапронова Світлана Юріївна²

1. здобувач третього (освітньо-наукового) ступеня вищої освіти

Національний транспортний університет, УКРАЇНА

ORCID ID: 0009-0007-3499-9413

2. д-р. техн. наук, професор, професор кафедри вагонів та вагонного господарства

Національний транспортний університет, УКРАЇНА

ORCID ID: 0000-0002-1482-1665

Анотація. Досліджено вплив конструкції підлоги вагона електропоїзда на її віброзахисні властивості, а саме, роль гумових амортизаторів у процесі гасіння вібрацій підлоги. Побудовано математичну модель ланцюга розповсюдження вібрацій від основи вагона до верхнього шару підлоги. В якості джерела вібрацій в математичній моделі застосовано кінематичне збурення основи вагона. Підтверджено, що вплив параметрів шару гумових амортизаторів на амплітудно-частотні характеристики підлоги є визначним для її віброзахисту.

Технічний стан приміських поїздів залізниць України характеризується значним зносом. Зокрема, близько 85% рухомого складу потребують капітального ремонту [1]. На замовлення Укрзалізниці ПрАТ «Київський електровагоноремонтний завод» («КЕВРЗ») виконує модернізацію електропоїздів серій ЕР-2, ЕР-9, ЕПЛ-2, ЕПЛ-9, ЕД-9М та ін. ПрАТ«КЕВРЗ» є єдиним в Україні підприємством, яке виконує глибоку модернізацію моторвагонного рухомого складу електропоїздів всіх серій. Створення електричного рухомого складу, який відповідає сучасним європейським нормам комфорту, безпеки руху, протипожежної безпеки, інформаційного забезпечення є головним завданням модернізації. Прорахунки економічної доцільності модернізації електропоїздів Укрзалізниці, що виробили свій строк

SECTION 13.

TRANSPORTS ET TECHNOLOGIES DE TRANSPORT

експлуатації, показали перевагу такого шляху у порівнянні із розгортанням проектування та виробництва нових поїздів. Особливо це доцільно в умовах воєнного стану України. Рішення про глибоку модернізацію електропоїздів надало можливість суттєво змінити конструктивну структуру підлоги вагонів. Одне з головних завдань модернізації – покращити характеристики віброізоляції приміської електрички. Для приміських електропоїздів є характерним періодичний режим руху з частими розгонами та гальмуванням в широкому діапазоні швидкостей. Такий режим руху є причиною вібрацій в широкому діапазоні частот, що передаються на пасажирів від сидінь та підлоги вагона.

Відома низка робіт, присвячених аналізу впливу вібрацій різних частот на відчуття комфорту та стан пасажирів. Зокрема в статті [2] наведено результати дослідження вібрацій на прикладі поїзда Тегеран-Андимешк (Іран). Досліджувався статистичний зв'язок психологічних та фізіологічних розладів у пасажирів в залежності від віку, статі, кількості поїздок та еквівалентного прискорення вагона. Підтверджено суттєвий вплив на самопочуття пасажирів еквівалентного прискорення вагона.

Аналіз літературних джерел [2–6] показує, що віброзахисні властивості підлоги електропоїзда залежать від двох груп чинників. Чинники першої групи пов'язані із джерелом вібрацій, що передаються на кузов вагона від візків та підвісного обладнання. При цьому безпосереднім збудувачем вібрацій для підлоги стає нижня обшива (основа) кузова. Важливим, не повністю висвітленим питанням залишається амплітудно-частотний розподіл збурень по площі підлоги. Друга група чинників це – віброізолюючі властивості підлоги, як ланцюга розповсюдження коливань від основи кузова до верхнього покриття підлоги. У проаналізованих джерелах не досліджувалися AFR шарів багат шарової структурованої підлоги вагонів. Уривкові дані про властивості різних матеріалів щодо гасіння вібрацій не дають змоги зробити оптимальний вибір структури підлоги. Також немає даних про використання для підлоги гумових пружних елементів – амортизаторів. Тому дослідження впливу структури підлоги вагона електропоїзда на рівень віброзахисту пасажирів є доцільним.

Один із проектів модернізації приміських електропоїздів передбачає оновлення конструктивної схеми підлоги аналогічної тій, що застосовується на пасажирських вагонах Крюківського вагонобудівного заводу (КВБЗ). Досліджуються віброізоляційні властивості підлоги для модернізованого вагона приміського електропоїзда з двох варіантів модернізації на основі конструкції вагонів КВБЗ мод. 61-776.

Висунуто гіпотезу дослідження: поліпшення віброізоляційних властивостей підлоги пасажирського вагона можливо досягти за рахунок багатошарової структури підлоги із суттєвою різницею пружно-дисипативних характеристик шарів. Вібрація, що передається пасажирам, нормується відповідно до ISO 2631-1-1997. Mechanical vibration and shock: Evaluation of human exposure to whole-body vibration [7].

На рис. 1 показано варіанти модернізації підлоги: варіант № 1 і варіант № 2.

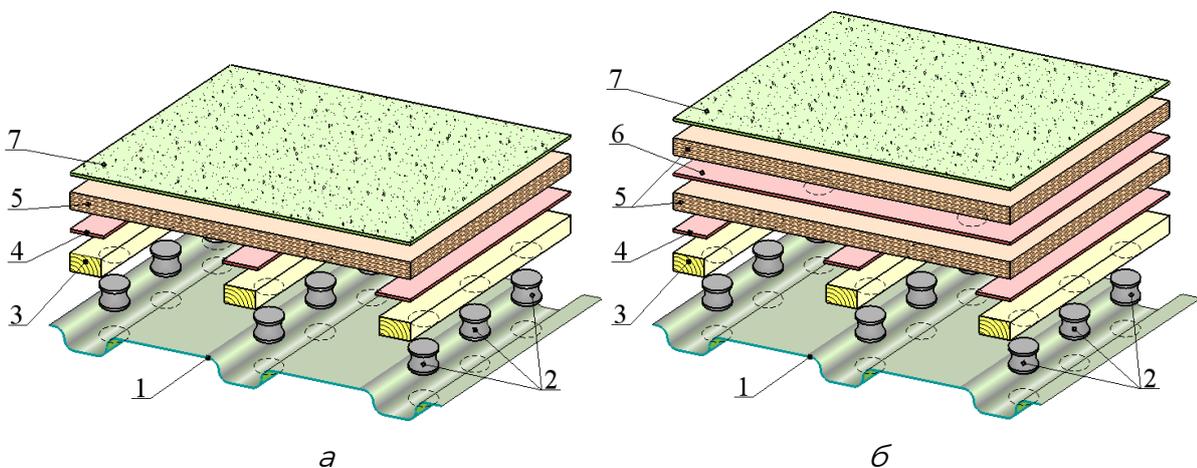


Рис. 1. **Варіанти модернізованої підлоги вагона:**

- a* – варіант № 1 – з використанням одного шару антивібраційної мембрани;
- б* – варіант № 2 – з використанням двох шарів фанерної підлоги і двох шарів антивібраційної мембрани; 1 – основа вагона; 2 – гумовий амортизатор;
- 3 – підлоговий брус; 4 – антивібраційна мембрана; 5 – лист підлоги;
- 6 – антивібраційна мембрана; 7 – верхнє покриття підлоги

Дослідження віброзахисних властивостей підлоги вагона виконано на математичній моделі з наступними спрощеннями і ідеалізаціями:

- в моделі розглядається розрахункова ділянка підлоги площею S ;
- розподілені параметри елементів підлоги приймаються зосередженими в межах розрахункової ділянки;
- коливальна система має вхід у вигляді гармонійного кінематичного збурення з боку основи вагона.

Для експериментального визначення пружно-дисипативних параметрів структурних складових математичної моделі підлоги використано вібраційний стенд (рис. 2).

SECTION 13.
TRANSPORTS ET TECHNOLOGIES DE TRANSPORT

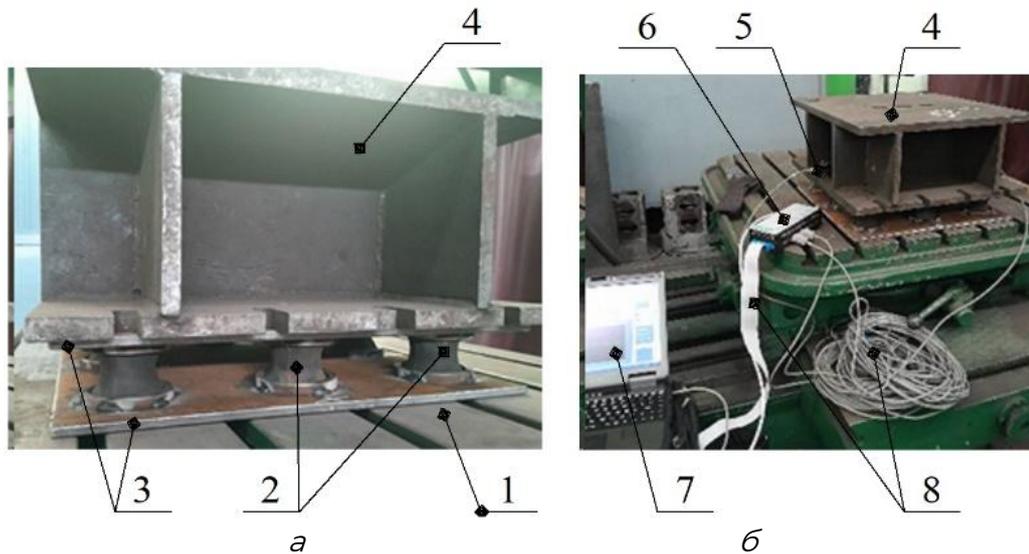


Рис. 2. **Стенд для дослідження пружно-дисипативних параметрів гумових амортизаторів:**

а – фото установки гумових амортизаторів;

б – загальний вигляд експериментальної установки: 1 – опорна плита; 2 – гумові амортизатори, що досліджуються; 3 – вібраційні плити; 4 – вантаж; 5 – акселерометри; 6 – блок перетворення сигналів; 7 – апаратура реєстрації; 8 – кабелі з'єднання

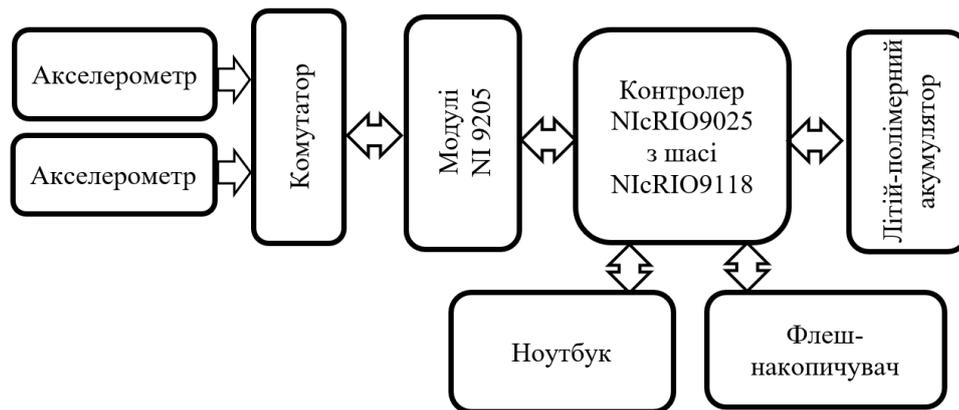


Рис. 3. **Блок-схема частини системи контрольних ходових випробувань одиниць рухомого складу**

Для вимірювань параметрів коливань, перетворення сигналів та реєстрації результатів експерименту використано систему контрольних ходових випробувань одиниць рухомого складу (СКХВ). СКХВ розроблено у

Регіональній філії АТ «Укрзалізниця» «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут залізничного транспорту» («НДКТІ УЗ»). Система базується на платформі National Instruments CompactRIO. В процесі досліджень реалізовано опцію СКХВ «Вимірювання прискорень в автономному режимі «чорного ящика» з подальшою статистичною обробкою. На рис.3 наведено блок-схему частини СКХВ, яка використовувалася для проведення експерименту.

Дослідження впливу параметрів структурних складових підлоги вагона на її віброзахисні властивості виконано на основі математичної моделі. Розрахункова схема для моделювання вібрацій, що передаються від основи вагона через підлогу і сидіння до пасажирів показана на рис. 4.

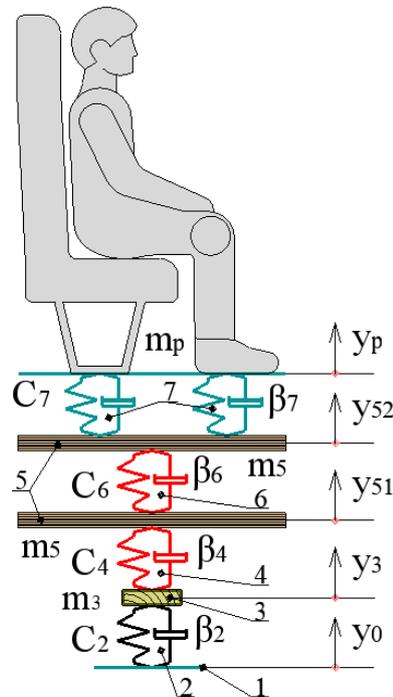


Рис. 4. Розрахункова схема моделювання вібрацій, що передаються від основи вагона через підлогу і сидіння до пасажирів

На рис. 4: позиція 1 – основа вагона; позиція 2 – пружно-дисипативний елемент – набір гумових амортизаторів з наступними параметрами: C_i , β_i – питома жорсткість і коефіцієнт демпфірування шару гумових амортизаторів підлоги, визначені експериментально, відповідно H/m^3 і $\text{H}\cdot\text{c}/\text{m}^3$; S – площа розрахункової ділянки підлоги, m^2 ; позиція 3 – система дерев'яних брусів – в межах розрахункової ділянки розглядається, як єдине жорстке тіло масою

SECTION 13.

TRANSPORTS ET TECHNOLOGIES DE TRANSPORT

m_3 , кг; позиція 4 – умовний пружно-дисипативний елемент, що моделює систему смуг антивібраційної мембрани, наклеєних на дерев'яні бруси; позиція 5 – шар фанерного настилу – розглядаються, як жорстке тіло з масою m_5 ; позиція 6 – умовний пружно-дисипативний елемент, що моделює шар антивібраційної мембрани між фанерними листами; позиція 7 – умовний пружно-дисипативний елемент, що моделює шар підлогового покриття.

При пасажиромісткості вагона 136 пасажирів (електропоїзд ЕПЛ2т) питома маса завантаження може коливатися від 100 до 450 кг/м² в залежності від наповнення вагона пасажирами.

Математичну модель коливальної системи «підлога-пасажир» побудовано на класичному рівнянні Лагранжа II роду:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial P}{\partial q_i} = 0, \quad (1)$$

де K , P – відповідно кінетична і потенційна енергії коливальної системи;

D – функція розсіювання умовних дисипативних елементів;

q, \dot{q} – вертикальні узагальнені координати та узагальнені швидкості інерційних елементів коливальної системи.

Отримані амплітудно-частотні характеристики показали, що область резонансних частот першої гармоніки знаходиться в діапазоні 8–22 Hz (рис. 5). Важливим результатом є отримана залежність резонансної частоти від питомої маси завантаження вагона. Важливо, що при зміні завантаження вагона пасажирами від мінімального (пустий вагон) – до максимального (150 % пасажиромісткості) резонансна частота може зменшуватися від 15–22 Hz до 8–12 Hz.

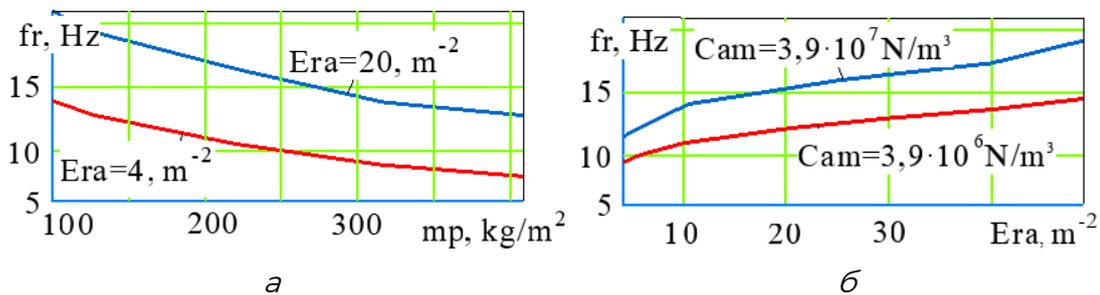


Рис. 5. Залежність резонансної частоти f_r підлоги від параметрів коливальної системи:

a – від питомої маси завантаження вагона m_p та епюри установки гумових амортизаторів E_{ra} ;

б – від епюри установки гумових амортизаторів E_{ra} та жорсткості антивібраційної діафрагми C_{am}

Отримані амплітудно-частотні характеристики коливань складових підлоги підтверджують гіпотезу про можливість поліпшення віброізолюючих властивостей пасажирського вагона на основі багатошарової структури з із суттєвою різницею пружно-дисипативних характеристик структурних шарів.

Висновки. Побудовано математичну модель розповсюдження вібрацій від основи вагона через підлогу до пасажирів. Розглянуто багатошарову розрахункову схему підлоги у двох варіантах: п'ятишарова і семишарова. При розрахунках використано параметри шарів підлоги, отримані експериментально методом вільних коливань. Використано питомі масові, пружні і дисипативні параметри шарів. Тим самим було здійснено перехід при моделюванні від розподілених параметрів до лінійних зосереджених.

2. Визначено наступні пружно-дисипативні параметри структурних складових підлоги вагона:

- жорсткість гумового амортизатора – $4,7 \cdot 10^4$ N/m;
- коефіцієнт демпфірування гумового амортизатора – 406 N·s/m;
- питома жорсткість антивібраційної мембрани – $2,6 \cdot 10^7$ N/m³;
- питомий коефіцієнт демпфірування антивібраційної мембрани – $3,5 \cdot 10^2$ N·s/m³.

3. Побудовано амплітудно-частотні характеристики структурних складових підлоги вагона. Аналіз AFR показав наявність області резонансних частот першої гармоніки в діапазоні 8–22 Hz. Переваг семишарової підлоги перед п'ятишаровою не виявлено. AFR для першого і другого шарів фанерного настилу – ідентичні. Підтверджено, що вплив шару гумових амортизаторів на AFR підлоги є визначаючим. Збільшення епюру установки амортизаторів з 4 до 20 units/m² підвищує резонансну частоту коливань підлоги в 2,25 рази. На основі даних про «небезпечні» для людини частоти коливань, отримано переважне значення епюру установки амортизаторів – 5–6 units/m².

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [1] Kulbovskiy I., Sapronova S., Holub H., Tkachenko V., Afanasieva I., & Safronov O. (2019). Development of a model for managing the quality of repair and maintenance of rolling stock in transport infrastructure projects. In *Transport Means – Proceedings of the International Conference, 2019-October*. 201–205. Вилучено з: <https://transportmeans.ktu.edu/wp-content/uploads/sites/307/2018/02/Transport-means-2019-Part-1.pdf>.
- [2] Nassiri, P., Koochpaei, A. R., Zeraati, H., & Shalkouhi, P. J. (2011). Train passengers comfort with regard to whole-body vibration. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 30(2), 125–136. Вилучено з: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1260/0263-0923.30.2.125>.



SECTION 13.

TRANSPORTS ET TECHNOLOGIES DE TRANSPORT

- [3] Gong, D., Duan, Y., Wang, K., & Zhou, J. (2019). Modelling rubber dynamic stiffness for numerical predictions of the effects of temperature and speed on the vibration of a railway vehicle car body. *Journal of Sound and Vibration*, 449, 121–139. Вилучено з: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.02.037>.
- [4] Gong, D., Wang, K., Duan, Y., & Zhou, J. (2020). Car body floor vibration of high-speed railway vehicles and its reduction. *Journal of low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 39(4), 925–938. Вилучено з: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1461348419850921>.
- [5] You, T., Zhou, J., Thompson, D. J., Gong, D., Chen, J., & Sun, Y. (2022). Vibration reduction of a high-speed train floor using multiple dynamic vibration absorbers. *Vehicle System Dynamics*, 60(9), 2919–2940. Вилучено з: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00423114.2021.1928248>.
- [6] Dižo, J., Blatnický, M., Gerlici, J., Leitner, B., Melnik, R., Semenov, S., ... & Kostrzewski, M. (2021). Evaluation of ride comfort in a railway passenger car depending on a change of suspension parameters. *Sensors*, 21(23), 8138. Вилучено з: <https://doi.org/10.3390/s21238138>.
- [7] ISO 2631-1-1997. Mechanical vibration and shock: Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Вилучено з: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/7612/0d54768e6e214481a8e814b20df83641/ISO-2631-1-1997.pdf>