

О. Ю. ЗАКОВОРОТНИЙ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ",

П. Е. РЕШЕТНИКОВА, асп., НТУ "ХПІ"

ОЦІНКА РІВНЯ КОМФОРТУ ПАСАЖИРІВ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНИХ КОЛИВАННЯХ ВАГОНА ПОЇЗДА

Пасажи́рський транспорт залишається одним з основних перевізників людей в Україні. Незалежно від цілі подорожі пасажирів завжди хочуть, щоб їх поїздка якомога комфортною та безпечною. На комфорт пасажирів впливають багато факторів, але серед них окремо виділяють вібрації або коливання рухомого складу. Роботу присвячено аналізу методів оцінки комфорту пасажирів та персоналу поїзда, які враховують вертикальні коливання вагона поїзда, які викликані нерівностями залізничної колії. У роботі проведено аналіз методів оцінки комфорту та якості поїздки за Шперлінгом, а також методи за стандартом EN 12299. Розроблено програму у системі MATLAB, яка реалізує зазначені методи оцінки комфорту. На основі даних імітаційної моделі вертикальних коливань отримано дані вертикальних прискорень вагона під час руху поїзда стиковим шляхом та оцінено рівень комфорту. Розроблене програмне забезпечення може бути використане для оцінки комфорту та якості поїздки, а також для сигналізування машиністові про шкідливий або небезпечний рівень коливань. Розроблене програмне забезпечення у подальшому може бути використане у системах підтримки прийняття рішень (СППР) бортових систем керування рухомого складу поїздів України. Лл.: 6. Табл.: 3. Бібліогр.: 24 назв.

Ключові слова: рухомий склад, коливальний процес, підстрибування, комфорт, система підтримки прийняття рішень, бортові системи керування.

Постановка проблеми. Залізничним транспортом щоденно користується багато людей. Незалежно від цілі та тривалості подорожі пасажирів завжди хочуть, щоб їх поїздка була не тільки швидкою, але й якомога комфортною та безпечною. Існує багато факторів, які впливають на комфорт: м'які сидіння, наявність чи відсутність кондиціонера, рівень шуму, освітлення, тощо. Серед таких факторів особливо виділяють вібрації та поштовхи, які розповсюджуються кузовом вагона та його складовими. Дослідження вчених різних країн світу показали, що залежно від інтенсивності, напрямку та частоти, а також тривалості їх впливу, вібрації або коливання вагона поїзда можуть пришвидшувати стомленість пасажирів, впливати на їх здатність виконувати певні сидячі дії і навіть на

стан їхнього здоров'я. Особливо несприятливими для людини є коливання з частотами в діапазоні 4 – 6 Гц, так як вони є резонансними для людини як для механічної системи [1].

Через складність врахування впливу усіх факторів на комфорт пасажирів в основі більшості методів визначення рівня комфорту та якості перевезення полягає саме вплив вібрацій рухомого складу. Такі коливання виникають під час руху поїзда залізничною колією внаслідок дії динамічних сил. Їх поділяють на вертикальні, повздовжні та поперечні в залежності від осі вздовж якої вони відбуваються. У даній роботі пропонується розглянути вплив на комфорт перевезення саме вертикальних коливань поїзда та його складових.

Вертикальні коливання можуть виникати за різних причин, до яких можна віднести зношення або дефекти системи підвішування, зокрема гасників коливань, коліс поїзда, а також рейок, якими він рухається. Через незадовільний стан залізничного полотна та застарілий рухомий склад для збереження конкурентоспроможності залізничного транспорту та його провідної ролі у перевезенні пасажирів в Україні постає проблема аналізу впливу нерівностей рейок та зношення підвішування на вертикальні коливання поїзда, а отже й на комфорт пасажирів під час поїздки [2, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До вертикальних коливань рухомого складу відносять підстрибування та галопування. Їх дослідженням займаються вчені як в Україні, так і за кордоном. Зазвичай такі дослідження проводяться на імітаційних моделях, у яких коливальні процеси кузова та візків вагона описані за допомогою системи диференціальних рівнянь другого порядку. Вони враховують розміри та масу поїзда, параметри його системи підвішування, характеристики його колісних пар, тощо [1]. В залежності від цілі та точності дослідження використовують різні варіанти задання збурюючого впливу, тобто нерівностей колії під колесами вагона [1, 4 – 6]. Такі моделі широко використовуються через їх відносно низьку вартість розробки та безпечність і легкість у використанні: вони дозволяють отримати дані без проведення замірів на реальному об'єкті, які потребують залучення спеціалізованої техніки та у деяких випадках перекриття певної ділянки шляху [5, 6].

Для обчислення негативного впливу коливань поїзда на його пасажирів та персонал вченими різних країн були розроблені численні методики, які фокусуються на різних типах залізничного сполучення, тривалості подорожі та розміщенні пасажирів вагоном. Велика кількість методів засновані на стандарті ISO-2631 [7] та методі Шперлінга [8, 9].

Методи, що лежать в основі ISO-2631, посприяли розробці стандартів, таких як ERRI [10 – 12], стандарт міжнародної залізничної організації UIC 513R [13] та європейський стандарт EN 12299 [14]. Такі методи широко використовуються дослідниками як європейських країн, так і країн ближнього та далекого Сходу [15 – 24].

Альтернативним, але методом, який все ще активно застосовується при оцінці комфорту перевезення, є метод Шперлінга, запропонований у 20 сторіччі. Він дозволяє обчислювати та оцінювати як комфорт, так і якість перевезення пасажирів залізничним транспортом. Він досі залишається одним із найбільш відомих методів у цій сфері [8, 9].

Методам оцінки комфорту та їх застосуванню присвячено чимало робіт вчених сучасності. Роботи [15, 16] розглядають найбільш популярні методи оцінки комфорту на залізницях країн світу. Роботи [15 – 21] проводять порівняльний аналіз зазначених вище методів. У роботі [22, 23] розраховується вплив параметрів системи підвішування на рівень комфорту пасажирів поїзда. Робота [24] присвячена впливу зношення бандажів колісних пар на підстрибування вагона, а відповідно й на комфорт людей, які в ньому знаходяться.

У даній роботі пропонується використовувати для розрахунку рівня комфорту пасажирів методи, викладені у стандарті EN 12299, та метод Шперлінга.

Метою статті є аналіз методів оцінки комфорту та якості перевезення пасажирів, а саме методу Шперлінга та європейського стандарту EN 12299, розробка програмного забезпечення, яке розраховує рівень комфорту за даними вертикальних коливань вагонів рухомого складу та сигналізує машиністові про шкідливий або небезпечний рівень коливань. Розроблене програмне забезпечення у подальшому може бути використане в бортових системах підтримки прийняття рішень машиністів на Укрзалізниці.

Методи оцінки комфорту поїздки. Метод Шперлінга. Метод, запроваджений Шперлінгом, відрізняється від методів, що засновані на стандарті ISO 2631. За цим методом для визначення комфорту та плавності ходу поїздки визначається за коефіцієнтом W_z . W_z – це середньоквадратичне значення прискорення, зважене за частотою, яке оцінюється за визначений проміжок часу або на визначеній ділянці шляху. W_z для плавності ходу (1) і для комфорту (2) розраховують окремо. Для оцінки плавності ходу розглядається сам екіпаж. Оцінка комфортності поїздки рухомим складом проводять з урахуванням впливу коливань на пасажирів. Рівняння для розрахування коефіцієнта записуються наступним чином:

$$W_z = 0,896 \left(\frac{a^3}{f} \right)^{\frac{1}{10}}; \quad (1)$$

$$W_z = 0,896 \left(\left(\frac{a^3}{f} \right) F(f) \right)^{\frac{1}{10}}, \quad (2)$$

де a – амплітуда прискорення, f – частота, $F(f)$ – коефіцієнт, який залежить від частоти та відповідає за чутливість людини до вібрацій.

Функція $F(f)$ для вертикальних та горизонтальних коливань відрізняється. У даній роботі увага концентрується саме на впливі вертикальних коливань, тому використовуємо саме варіант для вертикальних коливань.

Для розрахунків, які проводяться за допомогою обчислювальної техніки, формули W_z мають наступний вигляд:

$$W_z = (a^3 B^3)^{\frac{1}{10}}; \quad (3)$$

$$W_z = (a^2 B^2)^{\frac{1}{6.67}}, \quad (4)$$

де B – параметр спектрального вмісту прискорення частот.

Параметр спектрального вмісту розраховується за формулами (5) та (6).

Для оцінки плавності ходу поїзда:

$$B = 1.14 \left(\frac{(1-0.056f^2)^2 + (0.645f)^2(3.55f^2)}{(1-0.252f^2)^2 + (1.547f-0.00444f^3)^2(1+3.55f^2)} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Для оцінки комфорту за вертикальних коливань:

$$B_s = 0.588 \left(\frac{1.911f^2 + (0.25f^2)^2}{(1 - 0.277f^2)^2 + (1.563f - 0.0368f^3)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

За формулами (3) та (4) розраховуються показник W_z для кожної окремої частоти, сумарний коефіцієнт дорівнює:

$$W_{z\text{сум}} = (W_{z1}^{6,67} + W_{z2}^{6,67} + W_{z3}^{6,67} + \dots + W_{zn}^{6,67})^{\frac{1}{6,67}}$$

Так як сумарний коефіцієнт є неперервною функцією, його можна виразити за допомогою інтегрування за всім частотним інтервалом:

$$W_z = \left(\int_{0.5}^{30} a^2 B^2 df \right)^{\frac{1}{6.67}} \quad (7)$$

На рис. 1 наведено графік зважувальних кривих B , отриманих за формулою (7).

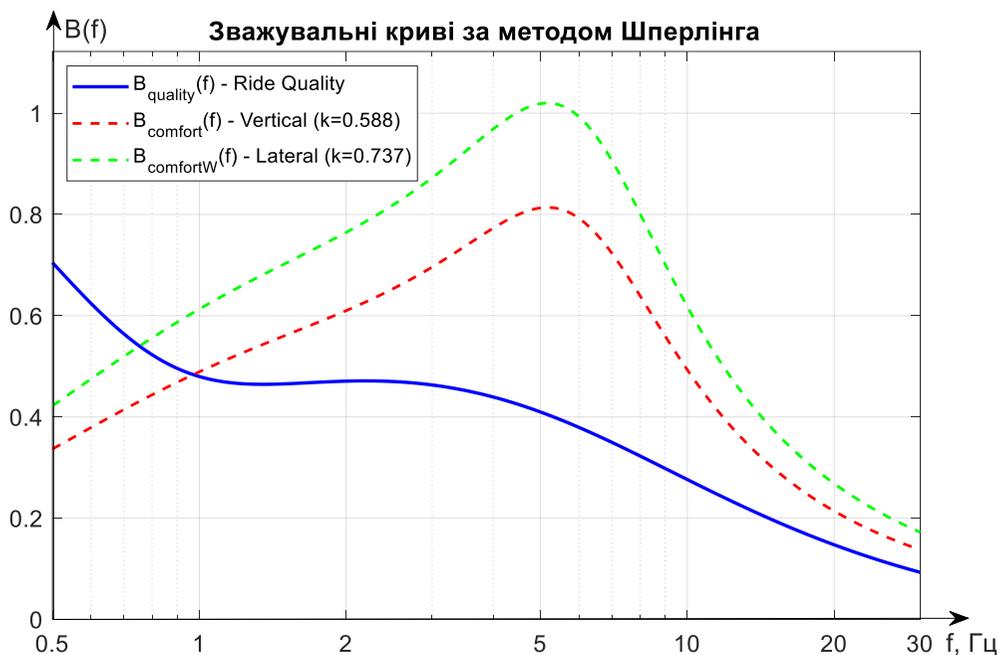


Рис. 1. Зважувальні криві B за методом Шперлінга

В табл. 1 наведена шкала показників, за якою визначається плавність ходу та комфортність.

Таблиця 1

Шкала показників для оцінки плавності ходу та комфортності

Показник плавності ходу	Якісна оцінка плавності ходу
1	Дуже добра
2	Добра
3	Задовільна
4	Прийнятна для експлуатації
4.5	Неприйнятна для експлуатації
5	Небезпечна
Показник комфорту	Оцінка комфортності (відчутних вібрацій)
1	Ледь помітні
2	Чітко розрізняються
2.5	Явно відчутні, але не неприємні
3	Сильні, нерегулярні, але переносимі
3.25	Дуже нерегулярні
3.5	Дуже нерегулярні, неприємні, дратуючі при тривалому впливі
4	Дуже неприємні, тривалий вплив (експозиція), шкідливо для здоров'я

Стандарт EN 12299 описує декілька різних методів вимірювання комфорту. До них відносяться стандартний та повний методи середнього комфорту, метод безперервного комфорту, які розраховуються для коливань у трьох напрямках, а також розрахунок комфорту у перехідних кривих та для дискретних подій, які спеціалізовані на коливаннях у поперечній площині.

У стандарті також надаються дані для розрахунку комфорту за вібрацій, які розповсюджуються різними частинами вагона, а саме підлогою, спинкою та основою сидіння. Для цього наводяться зважувальні криві для різних точок та видів коливань вагона.

Розглянемо методи, які враховують вертикальні коливання вагона, а саме методи стандартного середнього та безперервного комфорту. Оцінка середнього рівня комфорту, що проводиться в цьому стандарті, базується на співвідношенні між прискореннями, виміряними в поїзді, та оцінками середнього рівня комфорту, наданими репрезентативною групою пасажирів за 5-хвилинні періоди. Постійним комфортом за цим методом є

середньоквадратичне значення частотно-зважених прискорень, виміряних для оцінки середнього комфорту.

Згідно стандарту розрахунок середнього та безперервного комфорту виконується наступним чином:

1. Проводяться вимірювання прискорень коливань на підлозі транспортного засобу.
2. Виконується цифровізація разом з використанням відповідного фільтру згладжування.

Після чого обчислення проводиться через:

1. Частотне зважування сигналу за використання відповідних зважувальних кривих.
2. Розрахунок значень середньоквадратичних значень частотно-зважених прискорень для періодів часу довжиною 5 секунд, які використовуються для розрахунку безперервного комфорту.
3. Розрахунок 95-го перцентиля за період часу 5 хвилин.
4. Розрахунок середнього комфорту для кожного 5-хвилинного відрізка.

Для зважування сигналу при розрахунку вертикальних коливань використовується крива W_b . На відміну від кривих для горизонтальних коливань, крива W_b у EN 12299 відрізняється від аналогічних із стандартів ISO 2631-1 та EN ISO 8041. Згідно з EN 12299, діапазон частот у вертикальному напрямку рекомендовано зменшити до 40 Гц, якщо вертикальні коливання вимірюються на підлозі. Зважування відбувається за допомогою каскаду фільтрів (8).

$$H(f) = H_h(f)H_l(f)H_t(f)H_s(f), \quad (8)$$

де $H_h(f)$ – фільтр високих частот (ФВЧ), $H_l(f)$ – фільтр низьких частот (ФНЧ), $H_t(f)$ – фільтр переходу від прискорення до швидкості, $H_s(f)$ – фільтр висхідного градієнту.

Фільтри верхніх та нижніх частот разом утворюють смуговий фільтр. ФВЧ та ФНЧ, які використовуються у формулі (8) є фільтрами Баттерфорта другого порядку. Вони визначаються за наступними формулами:

$$H_h(f) = \frac{1}{1 - \left(\frac{f_1}{f}\right)^2 - i\frac{f_1}{Q_1 f}}, \quad H_l(f) = \frac{1}{1 - \left(\frac{f}{f_2}\right)^2 + i\frac{f}{Q_2 f_2}}$$

де f – частота, $f_1 = 0.4$ Гц та $f_2 = 100$ Гц – кутові частоти, $Q_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}$ – фактор резонансної якості, i – умовна одиниця.

Зважування пропорційне прискоренню на нижчих частотах і швидкості на вищих частотах. Перехід від прискорення до швидкості визначається наступним чином:

$$H_t(f) = \frac{\left(1 + i \frac{f}{f_3}\right)}{1 - \left(\frac{f}{f_4}\right)^2 + i \frac{f}{Q_2 f_4}},$$

де $f_3 = f_4 = 16$ Гц – кутові частоти, $Q_2 = 0.63$ – фактор резонансної якості.

Висхідний градієнт становить приблизно 6 дБ на октаву і пропорційний ривку:

$$H_s(f) = K \frac{1 - \left(\frac{f}{f_5}\right)^2 + i \frac{f}{Q_3 f_5}}{1 - \left(\frac{f}{f_6}\right)^2 + i \frac{f}{Q_4 f_6}},$$

де $f_5 = 2.5$ Гц та $f_6 = 4$ Гц – кутові частоти, $Q_3 = Q_4 = 0.8$ – фактор резонансної якості, $K = 0.4$.

На рис. 2 наведено графік зважувальної кривої W_b , отриманої за допомогою результуючого фільтру (8).

Після зважування можна переходити до розрахунку середньоквадратичних значень частотно-зважених прискорень для безперервного комфорту. Для вертикальних коливань рухомого складу їх формула має наступний вигляд:

$$a_{zP}^{W_b}(t) = \left[\frac{1}{T} \int_{t-T}^t \left(\ddot{z}_{W_b}^*(\tau) \right)^2 d\tau \right]^{0.5}, \quad (9)$$

де $a_{zP}^{W_b}$ – середньоквадратичних значень частотно-зважених прискорень вертикальних коливань, які вимірювалися на підлозі, $\ddot{z}_{W_b}^*$ – зважене прискорення, T – період, що дорівнює 5 секундам, t – загальний час, який складається з відрізків по 5 секунд.

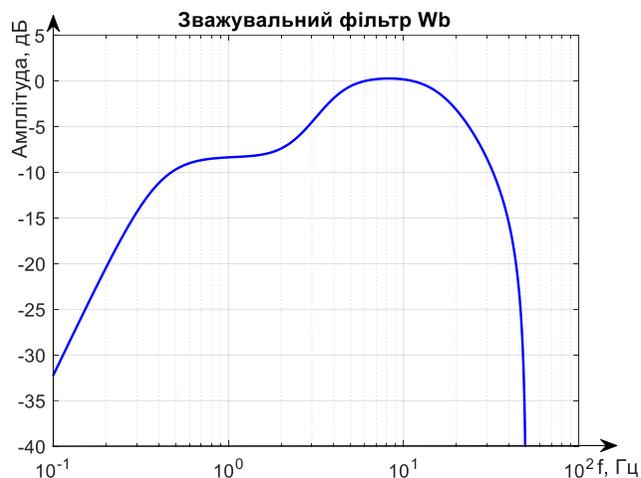


Рис. 2. Величина частотного зважування W_b для вертикальних коливань, що замірянь на підлозі

Безперервний комфорт є функцією від часу та визначається як:

$$C_{Cz}(t) = a_{ZP}^{W_b}(t) \tag{10}$$

Шкалу для оцінки безперервного комфорту наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Шкала оцінки безперервного комфорту при коливаннях у вертикальному напрямку

$C_{Cz}(t) < 0.20 \text{ м/с}^2$	Дуже комфортно
$0.20 \text{ м/с}^2 \leq C_{Cz}(t) < 0.30 \text{ м/с}^2$	Комфортно
$0.30 \text{ м/с}^2 \leq C_{Cz}(t) < 0.40 \text{ м/с}^2$	Задовільно
$0.40 \text{ м/с}^2 \leq C_{Cz}(t)$	Менш комфортно

Для розрахунку середнього комфорту N_{MV} за стандартним методом використовують формулу:

$$N_{MV} = 6 \sqrt{(a_{XP95}^{W_d})^2 + (a_{YP95}^{W_d})^2 + (a_{ZP95}^{W_b})^2},$$

де $a_{XP95}^{W_d}$, $a_{YP95}^{W_d}$, $a_{ZP95}^{W_b}$ – 95-й процентилі розподілу зважених середньоквадратичних прискорень у повздовжньому, поперечному та

вертикальному напрямках за п'ять секунд, розрахованих за 5-хвилинний період часу, відповідно.

За розрахунку середнього комфорту тільки за вертикальних коливань обирають формулу (11).

$$N_{MV} = 6 \cdot a_{ZP95}^{W_b} \quad (11)$$

Для набору з 60 зразків, тобто 5 хвилин п'ятисекундних середньоквадратичних значень, 95-й перцентиль – це 57-е значення.

Значення для оцінки середнього комфорту для 5-хвилиних зон наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Шкала для оцінки середнього комфорту N_{MV}

$N_{MV} < 1.5$	Дуже комфортно
$1.5 \leq N_{MV} < 2.5$	Комфортно
$2.5 \leq N_{MV} < 3.5$	Задовільно
$3.5 \leq N_{MV} < 4.5$	Некомфортно
$N_{MV} \geq 4.5$	Дуже некомфортно

Програмне забезпечення для оцінки комфорту та якості перевезення. Для проведення оцінки комфорту за обраними методами було обрано MATLAB разом із інтегрованим середовищем Simulink за точність математичних обчислень, яку підтримує MATLAB, та можливості графічного моделювання, які надає Simulink.

Так у пакеті Simulink була розроблена імітаційна модель вагона поїзда, яка враховує вертикальні коливання візків та кузова вагона за різних швидкостей руху. Вона побудована на основі системи диференціальних рівнянь другого порядку та дозволяє отримувати дані щодо підстрибування та галопування вагона як під за сталої швидкості, так і у таких перехідних режимах як розгін та гальмування за рахунок моделювання роботи еквівалентного двигуна поїзда. У якості збудника коливань в моделі виступає геометрична нерівність рейкової колії, яка отримана з даних спектральної щільності розподілу нерівностей і тому враховує не тільки періодичний, але й випадковий характер реальних нерівностей залізничної колії [4, 5].

Із отриманої моделі були одержані дані вертикальних прискорень вагона поїзда, які будуть використані у якості вхідних даних для оцінки

комфорту та якості перевезення за методами Шперлінга та середнього та безперервного комфорту за стандартом EN 12299.

Розроблене програмне забезпечення поділяється на два модулі. Перший модуль відповідає за застосування методу Шперлінга.

Після завантаження даних, для яких буде проводитися розрахунок комфорту, проводиться визначення параметрів вікна, що ковзає. Шириною вікна обрано 5 секунд з перекриттям у 4 секунди. На кожній ітерації вікна з даних видаляється середнє значення та застосовується вікно Хемінга для запобігання спектрального витоку. Після цього проводиться швидке перетворення Фур'є за допомогою функції $\text{fft}()$. Далі за формулами (5) та (6) в окремій функції проводиться розрахунок коефіцієнтів зважування B та B_s . Із усього спектру частот обираються частоти від 0.5 до 30 Гц, зважуються за допомогою отриманих коефіцієнтів та за формулою (7) розраховується показник W_z . Отримані значення комфорту та якості перевезення для кожного вікна інтерпретуються за табл. 1.

Другий модуль розраховує середній та безперервний комфорт за стандартом EN12299. Для цього окрема функція реалізує функції зважування шляхом реалізації каскаду фільтрів (8), який складається з смугового фільтру, фільтру переходу від прискорення до швидкості та фільтру висхідного градієнту. Графік такої функції наведено на рис. 2. Значення прискорень зважуються згідно цієї функції та розраховується безперервний комфорт згідно формулі (9) та інтерпретується за табл. 2.

Так як середній комфорт обчислюється для зон довжиною у 5 хвилин, дані з моделі спочатку сегментуються на відповідні відрізки. Проводиться сортування обраного сегменту та обрається 57-й елемент, який згідно стандарту є 95-м перцентилем, необхідним для розрахунку комфорту за формулою (11). Отримані значення інтерпретуються за табл. 3.

Результати роботи програми. Для демонстрації роботи програми розрахуємо комфорт поїздки вагоном поїзда, що їде рейковим шляхом із стиками. Поїзд виконує розгін до 52 км/год, після чого переходить до фази вибігу та, згодом, гальмування до повної зупинки. Для моделювання стикової нерівності стикової колії використовувалася двогорба нерівність із амплітудами 0.005 та 0.003 м. Моделювання проводиться 300 секунд, або 5 хвилин. На рис. 3 наведено графік вертикальних прискорень вагона поїзда.

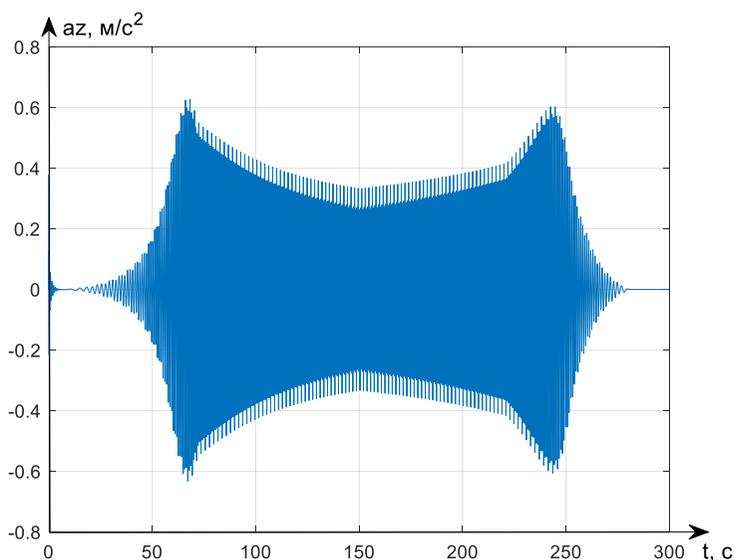


Рис. 3. Вертикальні прискорення вагона

На рис. 4 зображено результати розрахунку програмним забезпеченням комфорту та якості поїздки за методом Шперлінга. З графіку видно, що після 40 секунд моделювання якості поїздки змінилася з дуже доброї на добру, рівень комфорту – з ледь помітних коливань на ті, що чітко розрізняються. На 266 секунді обидва показники повертаються на початкові значення. Це пов'язано із тим, що в ці часові відмітки вагон проходить відмітку швидкості у 25 км/год, яка за обраних параметрах підвищення поїзда є критичною для комфорту за Шперлінгом.

Розглянемо показники безперервного та середнього комфорту за стандартом EN12299 для тих самих даних розгону вагона. На рис. 5 наведено графік безперервного комфорту. Показники комфорту за цим методом дорівнюють: мінімальне значення: 0.0000 м/с^2 , максимальне: 0.0634 м/с^2 , середнє: 0.0310 м/с^2 . Як і за методом Шперлінга, найкращі показники комфорту (дуже комфортно) помітні на швидкостях до 25 км/год. Максимальні показники при тому перевищують поріг категорії "Менш комфортно" і тому вважаються небажаними. Середнє значення за цим методом знаходиться на задовільному рівні.

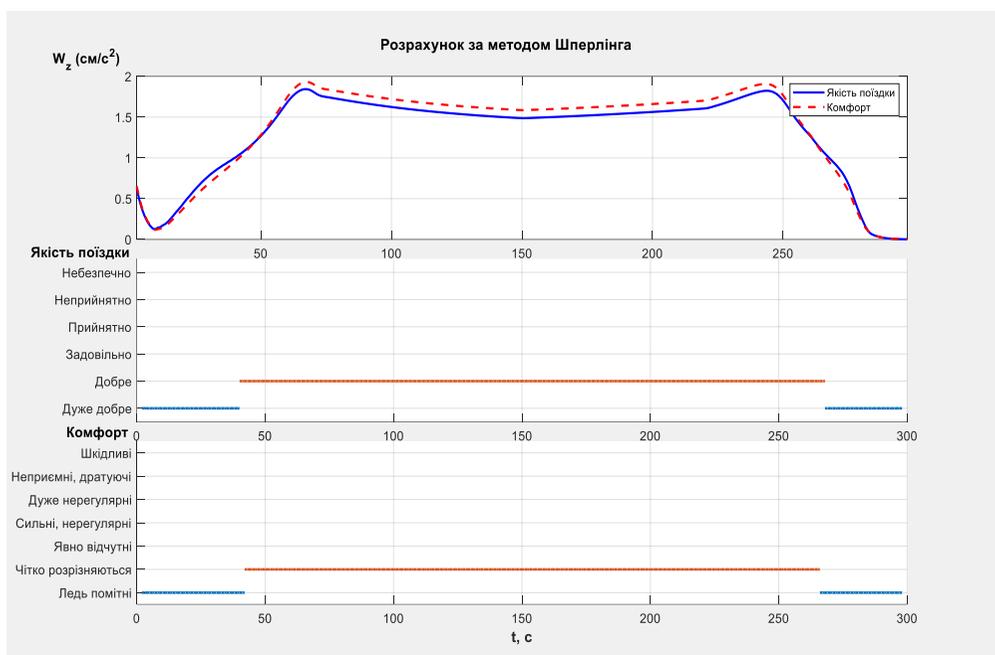


Рис. 4. Вікно показників комфорту та якості за Шперлінгом

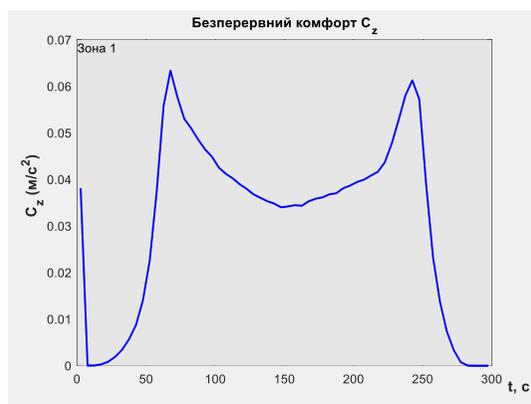


Рис. 5. Результати розрахунку безперервного комфорту

Значення середнього комфорту розраховується окремо для кожної зони довжиною у 5 хвилин, тобто 300 секунд. Так як тестова вибірка мала 300 секунд, то значення середнього комфорту N_{MV} буде обчислено тільки для однієї зони. Середній комфорт обчислюється на основі 95-го процентиля, який, згідно графіку, зображеному на рис. 6, має значення 0.057699 м/с^2 . Отже, незважаючи на те, що за методом безперервного

комфорту результати є тільки задовільними, метод середнього комфорту дає оцінку "Дуже комфортно".

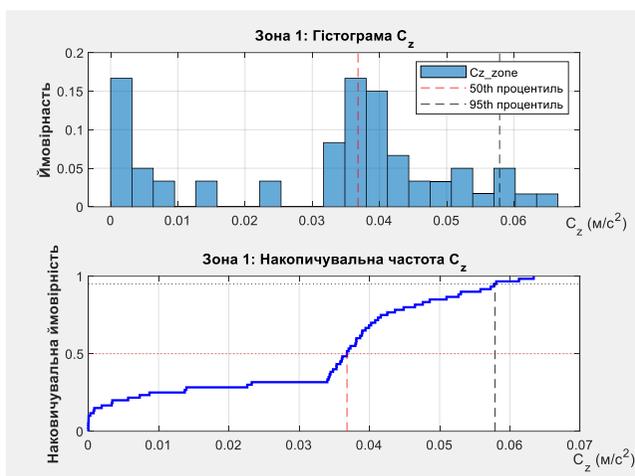


Рис. 6. Результати розрахунку середнього комфорту

Висновки. У статті авторами підкреслено необхідність підвищення рівня комфорту перевезення пасажирським залізничним транспортом України для підвищення його конкурентоспроможності, звернено увагу на особливий вплив на комфорт та якість поїздки коливань рухомого складу, зокрема тих, що відбуваються у вертикальному напрямку, та причини їх виникнення. Авторами проведено аналіз останніх досліджень у галузі моделювання вертикальних коливань рухомого складу (підстрибування, галопування) вченими країн світу та методів оцінки комфорту поїздки залізничним транспортом, які базуються на коливаннях або вібраціях вагона. Для подальших досліджень були обрані класичний метод Шперлінга, за яким може бути виконана оцінка як комфорту, так і якості поїздки, а також європейський стандарт EN 12299, який застосовується на залізницях Європейського Союзу та Великої Британії. Розглянуто суть та шкали оцінювання кожного з методів.

У пакеті MATLAB розроблена програма, яка на основі даних вертикальних прискорень вагона обчислює рівень комфорту як за метод Шперлінга, так і за методами безперервного та стандартного середнього комфорту за стандартом EN 12299. На основі моделі, розробленої у системі MATLAB Simulink, було отримано дані для проведення експерименту із рухом вагону стиковою залізничною колією за розгону до швидкості

52 км/год та його подальшого гальмування. Обидва методи показують кращий рівень комфорту за швидкості до 25 км/год. Результати оцінки на середньої частини перегону відрізняються. Метод безперервного комфорту показує нижчі значення комфорту аніж метод Шперлінга. Це відбувається через різну чутливість методів до різних частот коливань, яка відображається у різних кривих зважування, які наведені на рис. 1 та 2. Метод середнього комфорту показав найвищі результати. Такі результати пояснюються тим, що він розраховується на основі одного значення, 95-го перцентилу із значень зваженого прискорення. Стандартний метод середнього комфорту є приблизним та поступається повному методу середнього комфорту, який також описаний стандартом, та потребує значень повздовжніх та поперечних прискорень. Результати також корелюють із дослідженнями, проведеними в роботах [15, 16, 18].

Розроблене програмне забезпечення може бути використане для оцінки комфорту та якості поїздки а також для сигналізування машиністові про шкідливий або небезпечний рівень коливань. Розроблене програмне забезпечення у подальшому може бути використане у СППР бортових систем керування рухомого складу поїздів України.

Список літератури:

1. Garg, V. Dynamics of Railway Vehicle Systems / Garg, V., Dukkipati R. // New York: Academic Press, – 1984.
2. Інформаційне агенство УНІАН. Мінінфраструктури про стан потягів "УЗ": на 90% – металобрухт URL: <https://www.unian.ua/economics/transport/metalobruht-uminfrastrukturi-vislovilisya-pro-stan-potyagiv-uz-novini-ukrajina-11603764.html>
3. Каюкін В. О. Управління конкурентноспроможністю пасажирських перевезень залізничним транспортом в Україні: Проблеми та аналіз / Каюкін В. О. // Молодий вчений, 10 (62), 707-711.
4. 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. Том 1 № 79, 2025, с. 42–45
5. Решетнікова П. Е. Моделювання геометричної нерівності залізничної колії на основі нейронної мережі глибокого навчання / Решетнікова П. Е., Заковоротний О. Ю. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", Том 1 № 2 (14), 2025
6. Lin, J. Impact vibration behavior of railway vehicles: A state-of-the-art overview. / Lin, J.; Wang, K.; Zhai, W. // Acta Mech. Sin., – 2021. – 37, 1193–1221.
7. ISO 2631. Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration; ISO: Geneva, Switzerland, 1974.

- 8.** Helbig, W. Verfahren zur Beurteilung der Laufeigenschaften von Eisenbahnwagen. / Helbig, W.; Sperling, E. // Organ Für Die Fortschr. Des Eisenb. 1941, 96, 177–187.
- 9.** Sperling, E. Beitrag zur Beurteilung des Fahrkomforts in Schienenfahrzeugen. Glas. Ann. 1956, 80, 314–320.
- 10.** AS 2670-1. Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration. General Requirements; Standards Australia: Sydney, Australia, 1983.
- 11.** BS 6841. Guide to Measurement and Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Mechanical Vibration and Repeated Shock; BSI: London, UK, 1987.
- 12.** B153. Application of ISO Standard to Railway Vehicles; European Rail Research Institute: Utrecht, The Netherlands, 1993.
- 13.** UIC 513R. Guidelines for Evaluating Passenger Comfort in Relation to Vibration in Railway Vehicles; International Union of Railways: Paris, France, 1994.
- 14.** EN 12299. Railway Applications. Ride Comfort for Passengers. Measurement and Evaluation; British Standard: London, UK, 2009.
- 15.** Dumitriu M. Correlation between Ride Comfort Index and Sperling's Index for Evaluation Ride Comfort in Railway Vehicles. / Dumitriu M., Mihai, L. // Applied Mechanics and Materials. – 2018. – 880. 201-206.
- 16.** Jiang Y. 'A comparison study of ride comfort indices between Sperling's method and EN 12299' / Jiang Y., Chen B. K., Thompson C. // International Journal of Rail Transportation, – 2019. – 7(4), pp. 279–296.
- 17.** Torun Y. E. Trade-Off Study Among Ride Comfort and Safety Against Derailment in the Rail Vehicle Suspension Design. / Torun, Y.E., Erol, H. A // J. Vib. Eng. Technol. – 2025. – 13, 393
- 18.** Dumitriu, M. Study on the Evaluation Methods of the Vertical Ride Comfort of Railway Vehicle – Mean Comfort Method and Sperling's Method / Dumitriu, M., Stanica, D. I. // Appl. Sci.– 2021, 11,3953.
- 19.** Sattari S. Evaluation of Sperling's index in passenger and freight trains under different speeds and track irregularities / Sattari S., Saadat, M., Mirtalaie S. H., Salehi M., Soleimani A. // 2022. –15. – pp. 87-96.
- 20.** Dižo J. Evaluation of Ride Comfort in a Railway Passenger Car Depending on a Change of Suspension Parameters. / Dižo J., Blatnický M., Gerlici J., Leitner B., Melnik R., Semenov S., Mikhailov E., & Kostrzewski M. // Sensors, – 2021. – 21(23), 8138.
- 21.** Liu L. The effects for the ride comfort of high-speed trains' operating conditions on the open and tunnel track / Liu L. // 2015 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), Qingdao, 2015, pp. 1344-1349
- 22.** Sattari S. Modeling of a rail suspension system to investigate vertical vibration and effective parameters on it / Sattari S., Saadat, M., Mirtalaie S. H., Salehi M., Soleimani A. // – 2022.
- 23.** Kumar V. Investigation of vertical dynamic behaviour and modelling of a typical indian rail road vehicle through bond graph / Kumar V., Vikas R // World Journal of Modelling and Simulation. Vol. 5. – 2009.
- 24.** Dižo J. Assessment of the passenger ride comfort for a coach by means of simulation computations. / Dižo J., Blatnický M., Melnik R. // LOGI Sci. J. Transp. Logist. 2017, 8, 24 32.

References:

1. Garg V., Dukkipati R. (1984) Dynamics of Railway Vehicle Systems. New York: Academic Press.
2. UNIAN news agency. Ministry of Infrastructure on the condition of Ukrainian Railways trains: 90% are scrap metal URL: <https://www.unian.ua/economics/transport/metalobruht-u-mininfrastrukturi-vislovilisya-pro-stan-potyagiv-uz-novini-ukrajina-11603764.html>
3. Kayukin, V. O. Managing the competitiveness of passenger rail transport in Ukraine: Problems and analysis. Young Scientist, 10 (62), 707-711. (in Ukrainian) <https://molodyivchenyi.ua/index.php/journal/article/view/3871>
4. Reshetnikova, P., Zakovorotnyi, O. (2025) Modeling of vertical vibrations of a train arising during movement on a railway track with joint unevenness. Control, navigation, and communication systems. Volume 1 No. 79, 2025, pp. 42–45 DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.49-54>
5. Reshetnikova, P., Zakovorotnyi, O. (2025) Modeling geometric inequality of railway tracks based on deep learning neural networks Volume 1, No. 2 (14): Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". Kharkiv: NTU "KhPI". DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2025.02.03>
6. Lin J., Wang K., Zhai W. (2021) Impact vibration behavior of railway vehicles: A state-of-the-art overview. *Acta Mech. Sin.*, 37, 1193–1221.
7. ISO 2631. Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration; ISO: Geneva, Switzerland, 1974.
8. Helbig, W.; Sperling, E. (1941) Verfahren zur Beurteilung der Laufeigenschaften von Eisenbahnwagen. *Organ Für Die Fortschr. Des Eisenb.*, 96, 177–187.
9. Sperling, E. (1956) Beitrag zur Beurteilung des Fahrkomforts in Schienenfahrzeugen. *Glas. Ann.*, 80, 314–320.
10. AS 2670-1. Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration. General Requirements; Standards Australia: Sydney, Australia, 1983.
11. BS 6841. Guide to Measurement and Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Mechanical Vibration and Repeated Shock; BSI: London, UK, 1987.
12. B153. Application of ISO Standard to Railway Vehicles; European Rail Research Institute: Utrecht, The Netherlands, 1993.
13. UIC 513R. Guidelines for Evaluating Passenger Comfort in Relation to Vibration in Railway Vehicles; International Union of Railways: Paris, France, 1994.
14. EN 12299. Railway Applications. Ride Comfort for Passengers. Measurement and Evaluation; British Standard: London, UK, 2009.
15. Dumitriu M. Mihai L. (2018). Correlation between Ride Comfort Index and Sperling's Index for Evaluation Ride Comfort in Railway Vehicles. *Applied Mechanics and Materials*. 880. 201-206. [10.4028/www.scientific.net/AMM.880.201](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.880.201).
16. Jiang Y., Chen B. K. and Thompson C. (2019) A comparison study of ride comfort indices between Sperling's method and EN 12299, *International Journal of Rail Transportation*, 7(4), pp. 279–296. doi: 10.1080/23248378.2019.1616329.

17. Torun Y. E., Erol H. A. (2025) Trade-Off Study Among Ride Comfort and Safety Against Derailment in the Rail Vehicle Suspension Design. *J. Vib. Eng. Technol.* 13, 393. <https://doi.org/10.1007/s42417-025-01925-3>
18. Dumitriu, M.; Stanica, D. I. (2021) Study on the Evaluation Methods of the Vertical Ride Comfort of Railway Vehicle – Mean Comfort Method and Sperling’s Method. *Appl. Sci.*, 11,3953. <https://doi.org/10.3390/app11093953>
19. Sattari S. & Saadat M. & Mirtalaie S. H. & Salehi M. & Soleimani A. (2022). Evaluation of Sperling’s index in passenger and freight trains under different speeds and track irregularities. 15. 87-96. 10.30486/admt.2023.1963242.1367.
20. Dižo, J., Blatnický, M., Gerlici, J., Leitner, B., Melnik, R., Semenov, S., Mikhailov, E., & Kostrzewski, M. (2021). Evaluation of Ride Comfort in a Railway Passenger Car Depending on a Change of Suspension Parameters. *Sensors*, 21(23), 8138. <https://doi.org/10.3390/s21238138>
21. Liu L., (2015) The effects for the ride comfort of high-speed trains' operating conditions on the open and tunnel track. 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), Qingdao, 2015, pp. 1344-1349, doi: 10.1109/ICEMI.2015.7494443.
22. Sattari S. & Saadat M. & Mirtalaie S. H. & Salehi M. & Soleimani A. (2022). Modeling of a rail suspension system to investigate vertical vibration and effective parameters on it. DOI: 10.22068/ijrare.299
23. Kumar V. & Vikas R. (2009). Investigation of vertical dynamic behaviour and modelling of a typical indian rail road vehicle through bond graph. *World Journal of Modelling and Simulation. Vol. 5.*
24. Dižo, J.; Blatnický, M.; Melnik, R. (2017) Assessment of the passenger ride comfort for a coach by means of simulation computations. *LOGI Sci. J. Transp. Logist.*, 8, 24–32.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПІ" Леонов С.Ю.

Надійшла (received) 18.12.2025

Стаття прийнята до друку 10.01.2026

Опублікована 27.02.2026

Zakovorotnyi Oleksandr, Dr. Tech. Sci., Professor
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
Str. Kirpichova, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (097) 967-32-71, e-mail: Oleksandr.Zakovorotnyi@khpі.edu.ua
ORCID ID: 0000-0003-4415-838X

Reshetnikova Polina, PhD student
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
Str. Kirpichova, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +49 (15) 73-67-99-080, e-mail: polina.reshetnikova@cit.khpi.edu.ua
ORCID ID: 0000-0002-7936-6691

УДК 004.94

Оцінка рівня комфорту пасажирів при вертикальних коливаннях вагона поїзда / Заковоротний О. Ю., Решетнікова П.Е. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2026. – № 1 (15). – С. 4 – 22.

Пасажирський транспорт залишається одним з основних перевізників людей в Україні. Незалежно від цілі подорожі пасажирів завжди хочуть, щоб їх поїздка якомога комфортною та безпечною. На комфорт пасажирів впливають багато факторів, але серед них окремо виділяють вібрації або коливання рухомого складу. Роботу присвячено аналізу методів оцінки комфорту пасажирів та персоналу поїзда, які враховують вертикальні коливання вагона поїзда, які викликані нерівностями залізничної колії. У роботі проведено аналіз методів оцінки комфорту та якості поїздки за Шперлінгом, а також методи за стандартом EN 12299. Розроблено програму у MATLAB, яка реалізує зазначені методи оцінки комфорту. На основі даних імітаційної моделі вертикальних коливань отримано дані вертикальних прискорень вагона під час руху поїзда стиковим шляхом та оцінено у програмі рівень комфорту. Розроблене програмне забезпечення може бути використане для оцінки комфорту та якості поїздки, а також для сигналізуванню машиністові про шкідливий або небезпечний рівень коливань. Розроблене програмне забезпечення у подальшому може бути використане у системах підтримки прийняття рішень (СППР) бортових систем керування рухомого складу поїздів України. Іл.: 6. Табл. 3. Бібліогр.: 24 назв.

Ключові слова: рухомий склад, коливальний процес, підстрибування, комфорт, система підтримки прийняття рішень, бортові системи керування.

UDC 004.94

Assessment of passenger comfort during vertical oscillations of a train carriage / Zakovorotnyi O. Yu., Reshetnikova P. E. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2026. – № 1 (15). – P. 4 – 22.

Passenger transport remains one of the main modes of transportation in Ukraine. Regardless of the purpose of their trip, passengers always want their journey to be as comfortable and safe as possible. Many factors affect passenger comfort, but among them, vibrations or oscillations of rolling stock are singled out. The work is devoted to the analysis of methods for assessing the comfort of passengers and train personnel, which take into account the vertical oscillations of the train car caused by unevenness of the railway track. The paper analyzes methods for assessing comfort and ride quality according to Sperling, as well as methods according to the EN 12299 standard. A program has been developed in the MATLAB that implements these methods of comfort assessment. Based on the data of a simulation model of vertical oscillations, data on the vertical acceleration of the car during the movement of the train on a joint track was obtained and the level of comfort was assessed in the program. The developed software can be used to assess the comfort and quality of the trip, as well as to signal the driver about harmful or dangerous levels of vibrations. The developed software can be further used in decision support systems (DSS) of on-board control systems of Ukrainian trains. Fig.: 6. Tabl. 3. Ref.: 24 items.

Keywords: rolling stock, vibration process, bouncing, comfort, decision support system, on-board control systems.