

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.423.016.5:629.4.015

А. Я. КУЗИШИН^{1*,2}

^{1*}Каф. «Залізничний транспорт», Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79000, тел. +38 (032) 267 99 74, ел. пошта andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-3012-5395

²Львівський НДІ судових експертиз, вул. Липинського, 54, Львів, Україна, 79024, тел. +38 (032) 231 76 13, ел. пошта andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-3012-5395

Дослідження вертикальної динаміки електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» в умовах швидкісного руху

Мета. Встановити показники динамічних якостей вертикальної динаміки електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» під впливом випадкових нерівностей рейкової колії на прямій ділянці при швидкості руху до 250 км/год. **Методика.** У дослідженні застосовано комплексну просторову математичну модель електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» при взаємодії з рейковою колією, яка включає термодинамічну модель роботи пневматичної системи ресорного підвішування. Модель включає систему з 54 диференціальних рівнянь. Нерівності рейкової колії моделюються як випадковий процес і формуються методом задання білого шуму з подальшою фільтрацією фільтром Баттерворта, що забезпечує задані спектральні характеристики за довжинами хвиль та амплітудами. В якості показників динамічних якостей рухомого складу досліджуються коефіцієнти вертикальної динаміки першого та другого ступенів ресорного підвішування, а також вертикальні прискорення кузова. Коефіцієнти вертикальної динаміки визначались через величини сил, які виникають в комплекті ресорного підвішування. **Результати.** Отримано залежності коефіцієнтів вертикальної динаміки першого та другого ступенів ресорного підвішування, максимальних значень вертикального прискорення кузова від швидкості руху. Залежності мають нелінійний характер зміни на основі яких встановлено максимально допустимі швидкості руху електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» при заданих умовах утримання рейкової колії. Показники динамічних якостей швидкісного електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» отримано в режимі тари (порожній) та бруто (завантажений) вагона. **Наукова новизна.** На основі удосконаленої комплексної математичної моделі динамічної поведінки швидкісного рухомого складу з рейковою колією обґрунтовано теоретичні дані показників динамічних якостей в режимах, які характерні для експлуатаційних умов із врахуванням конструктивних особливостей рухомого складу, умов його взаємодії з рейковою колією та швидкості руху до 250 км/год. **Практична значимість.** Отримані показники динамічних якостей електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан», а також встановлені максимально допустимі швидкості руху можуть бути використані для обґрунтування умов його безпечної експлуатації в режимах швидкісного руху. Результати дослідження доцільно застосовувати під час проєктування, модернізації та вдосконалення систем ресорного підвішування швидкісного рухомого складу, а також при розробленні нормативної та експлуатаційної документації.

Ключові слова: швидкісний рухомий склад; показники динамічних якостей; математична модель; рейкова колія; конструктивні в'язі; коливання

Вступ

Запровадження швидкісного руху на залізничному транспорті України датовано ще 11 липня 2002 року. Проте тільки у 2012 р. Укрзалізницею були закуплені швидкісні електропоїзда подвійного живлення HRCS2 компанії Hyundai Rotem

(країна – Південна Корея) та EJ 675 компанії Škoda Vagonka (країна – Чехія) (рис. 1–2).

Паралельно з цим в Україні на Крюківському вагонобудівному заводі (далі – КВБЗ) розпочався випуск вітчизняного моторвагонного рухомого складу, а саме електро- та дизель-поїздів.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ



Рис. 1. Електропоїзд HRCS2

Fig. 1. Electric train HRCS2



Рис. 2. Електропоїзд подвійного живлення EJ 675

Fig. 2. Dual-power electric train EJ 675

У 2011–2012 роках КВБЗ випущено в експлуатацію міжрегіональний швидкісний двосистемний електропоїзд ЕКр–1 «Тарпан» (рис. 3).



Рис. 3. Двосистемний електропоїзд ЕКр–1 «Тарпан»

Fig. 3. Dual-system electric train EKr–1 «Tarpan»

Проте на сьогодні швидкісний рух в Україні так і не отримав належного розвитку. Незважаючи на наявність сучасного рухомого складу, він переважно експлуатується на значно нижчих швидкостях, ніж це дозволяють технічні можливості. У зв'язку з цим особливо актуальним стає проведення теоретичних досліджень динамічної

поведінки рухомого складу при його взаємодії з рейковою колією з швидкостями до 250 км/год.

Основною умовою їх безпечної експлуатації є дотримання допустимого рівня показників динамічних якостей [2, 9]. Зазначені показники головним чином залежать від конструктивних особливостей ресорного підвішування [11, 13] та умов взаємодії колісної пари з рейковою колією [8, 10].

Таким чином, дослідження динамічної поведінки сучасного українського швидкісного електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» в діапазоні швидкостей руху 120÷250 км/год з врахуванням конструктивних особливостей механічної частини рухомого складу та умов його взаємодії з рейковою колією є актуальною науковою задачею. Визначення показників динамічних якостей дозволить встановити допустимі швидкості руху та може використовуватись для обґрунтування умов безпечної експлуатації в режимах швидкісного руху.

Мета

Метою роботи є встановлення показників динамічних якостей вертикальної динаміки сучасного електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» під впливом випадкових нерівностей рейкової колії на прямій ділянці при швидкості руху до 250 км/год.

Для досягнення зазначеної мети необхідно виконати наступні дослідження:

1. Провести аналітичний опис збурень у математичній моделі.

2. Отримати залежності коефіцієнтів вертикальної динаміки першого, другого ступенів ресорного підвішування, максимальних значень вертикального прискорення кузова вагона від швидкості руху та амплітуди вертикальної нерівності рейкової колії.

3. Надати рекомендації щодо максимально допустимих швидкостей руху електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» на прямій ділянці колії.

Методика

В якості збурення математичної моделі розглядаються відхилення рейкових ниток від прямолінійного контуру у вертикальній та горизонтальній площинах (рис. 4).

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

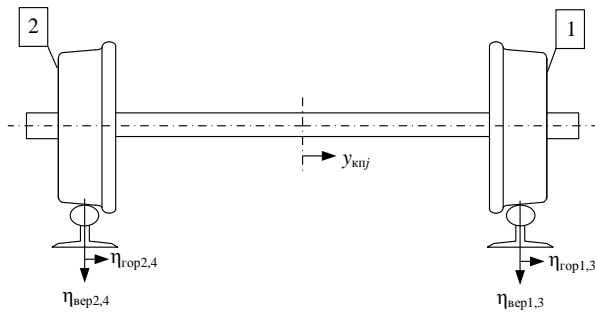


Рис. 4. Положення колісної пари в рейковій колії, яка має вертикальні та горизонтальні нерівності:
1 – праве колесо; 2 – ліве колесо

Fig. 4. Position of the wheelset in a railway track with vertical and horizontal irregularities:
1 – right wheel; 2 – left wheel

На даний час існує декілька методів задання нерівностей рейкової колії, які дозволяють відтворити реальний спектр нерівностей як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямках. До таких методів належать: метод задання білого шуму з додатковим використанням фільтра Баттерворта, спектральний метод (метод фільтрації або суперпозиції гармонік), метод авторегресійної моделі та ін. [12, 16–18]. Спектральний метод та метод авторегресійної моделі мають низку недоліків, зокрема, штучний періодичний вигляд профілю нерівностей, зумовлений синусоїдальними складовими, неврахування складних нелінійних процесів і змін параметрів уздовж колії, потребу у великій кількості гармонік, що ускладнює обчислення, а також має високу чутливість до вибору порядку моделі та ризик формування нереалістичних кореляцій у профілі.

Тому для відтворення реального спектра нерівностей використаємо метод задання білого шуму з додатковим застосуванням фільтра Баттерворта.

Білий шум – це випадкові коливання, спектр яких містить безліч синусоїдальних компонент із дуже малими амплітудами [1]. Властивостями білого шуму є:

– нульове математичне сподівання [15]:

$$E[z(t)] = 0 \quad (1)$$

– дельта-кореляція [14]:

$$R_z(\tau) = E[z(t)z(t + \tau)] = N_0\delta(\tau) \quad (2)$$

де $R_z(\tau)$ – автокореляційна функція; $\delta(\tau)$ – дельта-функція Дірака (має нескінченне значення в точці $\tau = 0$, і нуль в усіх інших, з одиничною площею під графіком); N_0 – постійна (щільність потужності).

– постійна спектральна щільність:

$$S_z(f) = \text{const} = N_0/2 \quad (3)$$

де $S_z(f)$ – спектральна щільність потужності.

Для отримання реального спектру нерівностей рейкової колії згідно з ДСТУ EN 13848–1:2022 (EN 13848–1:2009, IDT) [3] необхідно застосувати смуговий фільтр Баттерворта 4-ого порядку із заданням довжини хвилі вертикальної нерівності від 3 м до 25 м. Крім цього, рекомендується застосовувати відповідні межі передавальної функції на основі допустимих значень затухання сигналу на різних довжинах хвиль. Для моделювання горизонтальної нерівності відповідно до [7] довжину хвилі нерівності рекомендується приймати від 10 м до 15 м.

У цифровому вигляді (дискретний час) передавальна функція смугового фільтра Баттерворта 4-ого порядку визначається за формулою:

$$H(z_{\text{КОМ}}) = \frac{b_0 + b_1 z_{\text{КОМ}}^{-1} + b_2 z_{\text{КОМ}}^{-2} + b_3 z_{\text{КОМ}}^{-3} + b_4 z_{\text{КОМ}}^{-4}}{a_0 + a_1 z_{\text{КОМ}}^{-1} + a_2 z_{\text{КОМ}}^{-2} + a_3 z_{\text{КОМ}}^{-3} + a_4 z_{\text{КОМ}}^{-4}} \quad (4)$$

де $b_0 \dots b_4$ – коефіцієнти, які визначають пропускання сигналу; $a_0 \dots a_4$ – коефіцієнти, які формують затухання і крутизну фільтра; $z_{\text{КОМ}}$ – змінна в комплексній площині, яка описує частоту і фазу дискретного сигналу.

Таким чином, для оцінки динамічних властивостей вагона електропоїзда та показників його динамічних якостей збурення рейкової колії у вертикальній та горизонтальній площинах використовується спектр нерівностей колії, що наведений на рис. 5–6.

Показниками динамічних якостей вагона сучасного електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» у вертикальному напрямку є коефіцієнти вертикальної динаміки першого та другого ступенів ресорного підвішування, а також вертикальні прискорення кузова.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

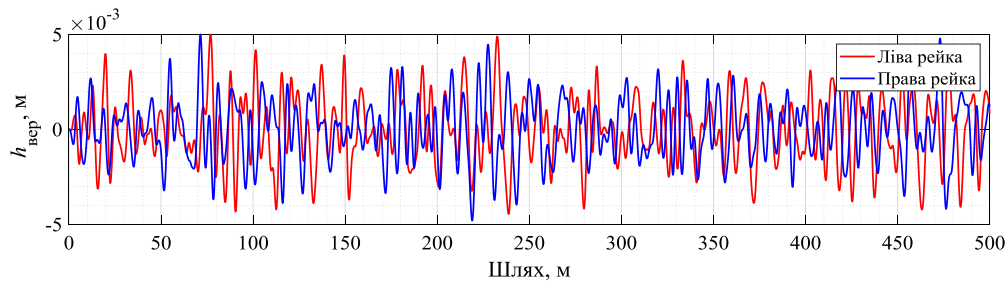


Рис. 5. Спектр вертикальних нерівностей рейкової колії в діапазоні довжин хвиль 5–25 м, згенерований на основі білого шуму з використанням фільтра Баттерворта

Fig. 5. The spectrum of vertical irregularities of the railway track in the wavelength range of 5–25 m, generated on the basis of white noise using a Butterworth filter

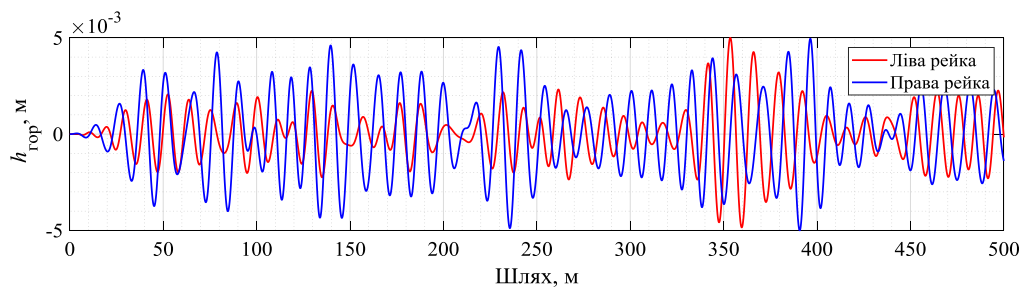


Рис. 6. Спектр горизонтальних нерівностей рейкової колії в діапазоні довжин хвиль 10–15 м, згенерований на основі білого шуму з використанням фільтра Баттерворта

Fig. 6. The spectrum of horizontal irregularities of the railway track in the wavelength range of 10–15 m, generated on the basis of white noise using a Butterworth filter

Коефіцієнти вертикальної динаміки першого та другого ступенів ресорного підвішування можна визначити через величини сил або прогинів, які виникають в комплекті ресорного підвішування [5]:

$$k_{в.д.} = \frac{F_{в.д.}}{F_{в.ст.}} \quad (5)$$

де $F_{в.д.}$ – вертикальна динамічна добавка сили, що виникає в комплекті ресорного підвішування; $F_{в.ст.}$ – вертикальна статична сила в комплекті ресорного підвішування.

Вертикальна динамічна добавка сили, що виникає в комплекті ресорного підвішування другого ступеня при проведенні розрахунків знаходиться за формулою:

$$F_{в.д.} = (p_j(t) - p_0) \cdot A_j(t) \quad (6)$$

де p_j – внутрішній тиск в пневматичній ресорі, отриманий у ході проведення математичного

моделювання [6]; p_0 – початковий тиск робочого тіла пневматичної ресори; A_j – ефективна площа пневматичної ресори у процесі її деформування.

Вертикальна динамічна добавка сили, що виникає в комплекті ресорного підвішування першого ступеня знаходиться за формулами:

– для першого візка:

$$P_{nzi} = k_{zi} \cdot \Delta z_i' \quad (7)$$

– для другого візка:

$$P_{nzi} = k_{zi} \cdot \Delta z_i'' \quad (8)$$

де k_{zi} – вертикальна еквівалентна жорсткість комплексу пружин першого ступеня ресорного підвішування; $\Delta z_i'$ і $\Delta z_i''$ – вертикальні деформації пружин першого та другого візка відповідно.

Прискорення кузова у вертикальній площині знайдені на основі комплексної просторової математичної моделі:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$a_{zk} = \frac{-\sum_{j=1}^4 P_j - \sum_{j=1}^4 P_{в.винj} - \sum_{j=1}^4 P_{вj} + m_k g}{m_k} \quad (9)$$

де P_j – вертикальні реакції пневматичних ресор другої ступені ресорного підвішування; $P_{в.винj}$ – вертикальна складова реакції гідравлічних гасників коливальних виносів у другій ступені ресорного підвішування; $P_{вj}$ – вертикальні реакції вертикальних гідравлічних гасників коливання другої ступені ресорного підвішування; m_k – маса кузова; g – прискорення вільного падіння.

Особливістю проведених досліджень є комплексне врахування конструктивних особливостей механічної частини електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» та реальних експлуатаційних умов взаємодії колісної пари з рейковою колією.

Результати

Дослідження впливу випадкового спектру нерівностей рейкової колії на коефіцієнти вертикальної динаміки першого та другого ступенів ресорного підвішування, прискорення кузова проводилось при довжині вертикальної нерівності $5 \div 25$ м та амплітуді $5 \div 15$ мм.

Як результат, на основі математичного моделювання взаємодії електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» з рейковою колією отримано залежності коефіцієнтів вертикальної динаміки першого та другого ступенів ресорного підвішування при тиску в пневматичній системі ресорного підвішування 5 атм. (рис. 7–8), що відповідає руху в режимі тари.

Аналіз отриманих результатів (рис. 7) показує, що при амплітуді вертикальної нерівності рейкової колії 5 мм значення коефіцієнта вертикальної динаміки першої ступені змінюється від 0,162 до 0,354 у діапазоні швидкостей 120–250 км/год. При амплітуді 7 мм коефіцієнт варіює від 0,226 до 0,491, а при 9 мм – від 0,29 до 0,627. Для амплітуд нерівностей 11 мм і більше значення коефіцієнтів вертикальної динаміки першої ступені ресорного підвішування у зазначеному діапазоні швидкостей перевищують допустимі межі. Так, при швидкості 120 км/год значення коефіцієнта становить 0,354 для амплітуди 11 мм, 0,417 – для 13 мм та 0,481 – для 15 мм.

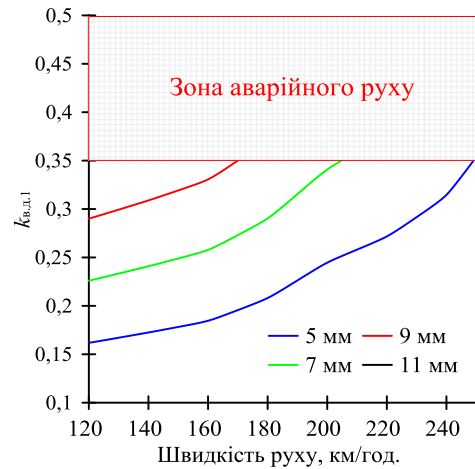


Рис. 7. Залежності коефіцієнтів вертикальної динаміки першої ступені ресорного підвішування від швидкості руху

Fig. 7. Dependences of the vertical dynamic coefficients of the first stage of the suspension on the vehicle speed

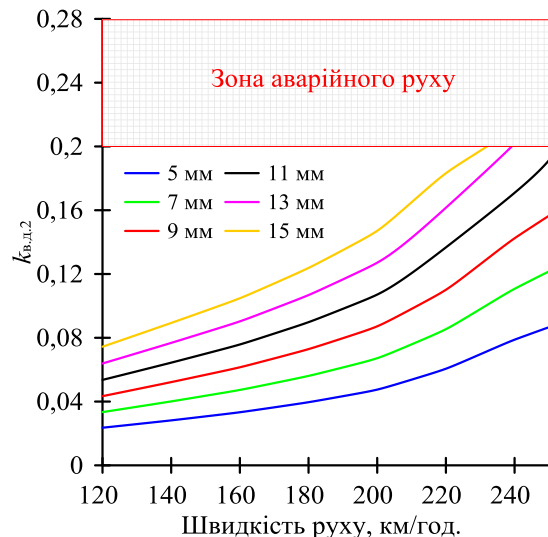


Рис. 8. Залежності коефіцієнтів вертикальної динаміки другої ступені ресорного підвішування від швидкості руху

Fig. 8. Dependences of the vertical dynamic coefficients of the second stage of the suspension on the vehicle speed

Аналітичний аналіз залежностей коефіцієнтів вертикальної динаміки другої ступені ресорного підвішування від швидкості руху (рис. 8) показав, що значення коефіцієнтів зростає з амплітудою нерівностей рейкової колії. У діапазоні швидкостей 120–250 км/год вони змінюються наступним чином: 5 мм – 0,024–0,087; 7 мм – 0,033–0,122; 9 мм – 0,043–0,156; 11 мм – 0,054–0,191; 13 мм – 0,064–0,226; 15 мм – 0,074–0,261.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Враховуючи, що основним завданням електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» є перевезення пасажирів, проведемо дослідження коефіцієнтів вертикальної динаміки в режимі бруто (тиск в пневматичній системі підвішування складає 710 Па.).

Залежності коефіцієнтів вертикальної динаміки першого та другого ступенів ресорного підвішування від швидкості руху та амплітуди вертикальної нерівності рейкової колії наведено на рис. 9–10.

Аналіз отриманих залежностей (рис. 9) показує, що при амплітуді вертикальної нерівності 5 мм та зміні швидкості руху від 120 км/год до 250 км/год коефіцієнт вертикальної динаміки першої ступені зростає та змінюється від 0,118 до 0,251; при амплітуді 7 мм – від 0,165 до 0,349; при амплітуді 9 мм – від 0,212 до 0,448; при амплітуді 11 мм – від 0,259 до 0,546; при амплітуді 13 мм – від 0,305 до 0,645 та при амплітуді 15 мм – від 0,352 до 0,743. Наведені залежності мають нелінійний характер зміни та будуть використані при встановленні максимальної допустимої швидкості руху електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» при заданих умовах утримання рейкової колії.

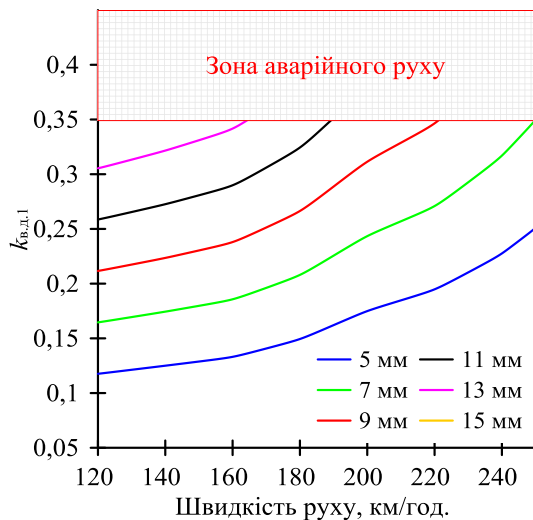


Рис. 9. Залежності коефіцієнтів вертикальної динаміки першої ступені ресорного підвішування від швидкості руху

Fig. 9. Dependences of the vertical dynamic coefficients of the first stage of the suspension on the vehicle speed

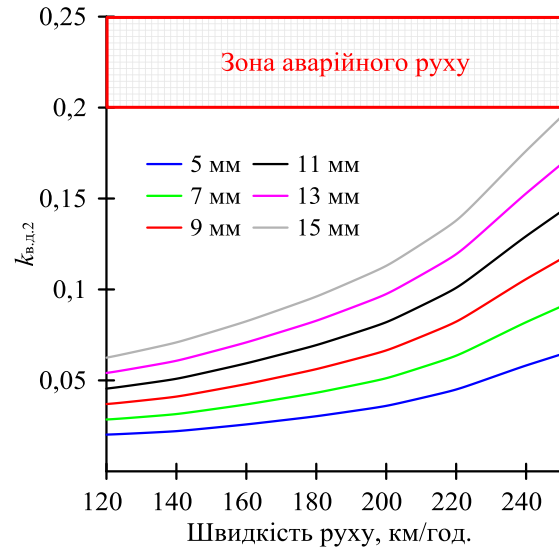


Рис. 10. Залежності коефіцієнтів вертикальної динаміки другої ступені ресорного підвішування від швидкості руху

Fig. 10. Dependences of the vertical dynamic coefficients of the second stage of the suspension on the vehicle speed

Залежності коефіцієнтів вертикальної динаміки другої ступені підвішування від швидкості руху (рис. 10) показують, що допустиме значення величиною 0,2 при заданих амплітудах вертикальної нерівності рейкової колії в діапазоні 5÷15 мм не було перевищено. Це свідчить про ефективні характеристики пневматичної системи ресорного підвішування та показує важливість використання такої системи у рухомому складі при експлуатації в умовах швидкісного руху.

Окрім дослідження коефіцієнтів вертикальної динаміки, актуальним є оцінювання значень вертикальних прискорень кузова, оскільки вони визначають плавність ходу та комфортабельність перевезення пасажирів. Залежності максимальних значень вертикального прискорення кузова в режимі бруто від швидкості руху наведено на рис. 11.

Експериментально встановлено, що при амплітуді вертикальної нерівності рейкової колії величиною 5 мм у діапазоні швидкостей руху 120÷250 км/год максимальне значення прискорень кузова змінюється від 0,084 до 0,253; при амплітуді 7 мм – від 0,118 до 0,359; при амплітуді 9 мм – від 0,154 до 0,467; при 11 мм – від 0,189 до 0,574; при 13 мм – від 0,227 до 0,682; та при 15 мм від 0,265 до 0,79.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

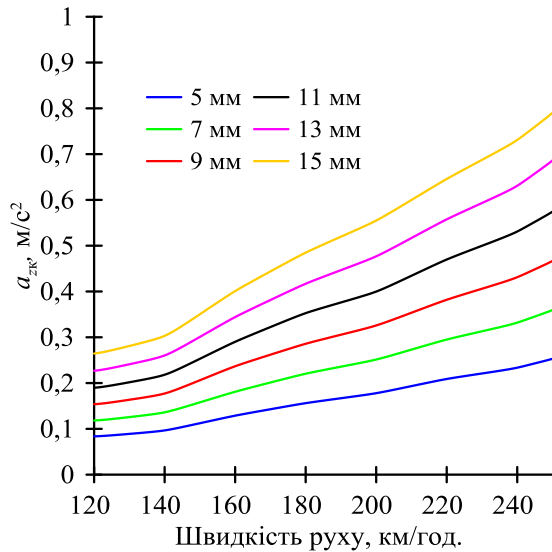


Рис. 11. Залежності максимальних значень вертикального прискорення кузова електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» від швидкості руху

Fig. 11. Dependences of the maximum vertical acceleration of the ЕКр–1 «Tarpan» train car body on vehicle speed

Також визначено, що при амплітуді вертикальної нерівності рейкової колії в діапазоні 5–15 мм різниця у відсотковому еквіваленті в режимі бруто по відношенню до режиму тари знаходиться в межах 18,5–27,3 %.

На основі отриманих значень показників динамічних якостей та їх граничних значень відповідно до вимог [4] встановлено допустимі швидкості руху електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» на прямій ділянці колії залежно від геометричних параметрів рейкової колії (рис. 12–13).

Встановлено, що в режимі тари при горизонтальній нерівності довжиною 10–15 м та амплітуді 9 мм, максимально допустима швидкість за коефіцієнтами вертикальної динаміки першого та другого ступенів ресорного підвішування, а також за максимальними значеннями вертикальних прискорень кузова вагона складає: при вертикальній нерівності довжиною 5–25 м та амплітуді 5 мм – 250 км/год, при амплітуді 7 мм – 205 км/год, при амплітуді 9 мм – 170 км/год. При амплітудах 11–15 мм не допускається рух з швидкостями 120–250 км/год.

В режимі бруто максимально допустима швидкість складає: при вертикальній нерівності довжиною 5–25 м та амплітуді 5 мм – 250 км/год, при амплітуді 7 мм – 250 км/год, при амплітуді 9 мм –

220 км/год, при 11 мм – 190 км/год, при 13 мм – 165 км/год. При амплітуді 15 мм в діапазоні швидкостей 120–250 км/год експлуатація заборонена.

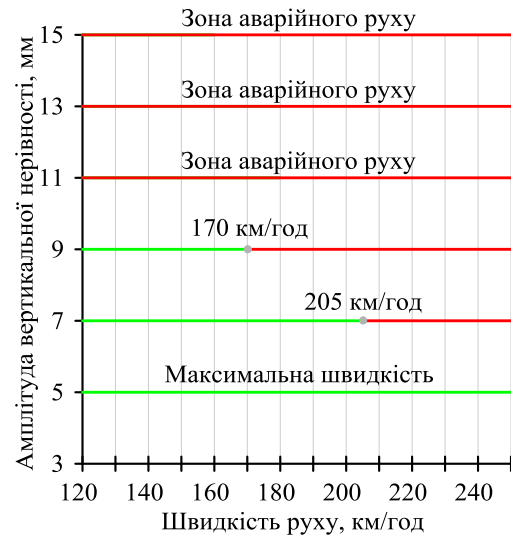


Рис. 12. Допустимі швидкості руху електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» у режимі тари на прямій ділянці

Fig. 12. Permissible operating speeds of the ЕКр–1 «Tarpan» electric train in empty (tare) condition on a straight track section

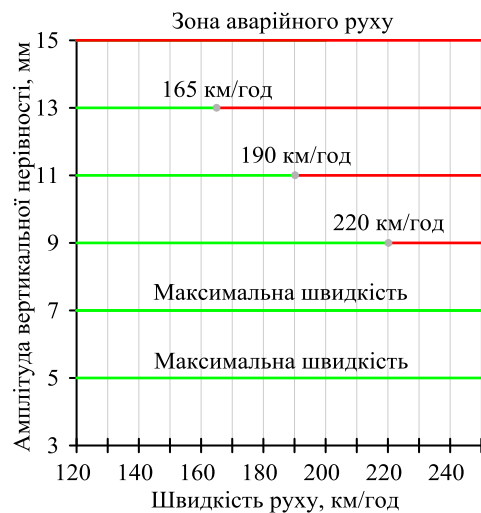


Рис. 13. Допустимі швидкості руху електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» у режимі бруто на прямій ділянці

Fig. 13. Permissible operating speeds of the ЕКр–1 «Tarpan» electric train in gross (loaded) condition on a straight track section

Отримані результати дозволяють стверджувати, що під час досліджень максимально допустимих швидкостей руху швидкісного рухомого

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

складу особливе місце посідає питання утримання рейкової колії. Технічний стан колії, її геометричні параметри та величина нерівностей безпосередньо впливають на характер динамічної взаємодії рухомого складу з рейковою колією, показники динамічних якостей, безпеку руху та комфорт пасажирів. Належне утримання рейкової колії є необхідною умовою для забезпечення стабільної та безпечної експлуатації швидкісних поїздів, а також для реалізації можливостей підвищення швидкостей руху відповідно до технічних можливостей рухомого складу.

Наукова новизна та практична значимість

На основі удосконаленої комплексної математичної моделі динамічної поведінки швидкісного рухомого складу з рейковою колією обґрунтовано теоретичні дані показників динамічних якостей в режимах, які характерні для експлуатаційних умов із врахуванням конструктивних особливостей рухомого складу, умов його взаємодії з рейковою колією та швидкості руху до 250 км/год. Отримані показники динамічних якостей електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан», а також встановлені максимально допустимі швидкості руху можуть бути використані для обґрунтування умов безпечної експлуатації в режимах швидкісного руху. Результати дослідження доцільно застосовувати під час проектування, модернізації та вдосконалення систем ресорного підвішування швидкісного рухомого складу, а також при розробці нормативної та експлуатаційної документації.

Висновки

1. Отримано спектр вертикальних нерівностей рейкової колії у діапазоні довжин хвиль 5–25 м та горизонтальних нерівностей у діапазоні

довжин хвиль 10–15 м. Означені спектри нерівностей згенеровані на основі білого шуму з використанням фільтра Баттерворта в програмному комплексі Matlab та використовується у якості збурення в математичній моделі електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан».

2. Встановлено, що при впливі випадкового спектра вертикальних нерівностей рейкової колії з амплітудою понад 11 мм в порожньому режимі коефіцієнт вертикальної динаміки першого ступеня ресорного підвішування перевищує допустимі значення на всьому діапазоні швидкостей 120–250 км/год. Для другого ступеня підвішування перевищення відбувається лише локально і проявляється на високих швидкостях при амплітуді нерівностей від 13 мм. У завантаженому режимі коефіцієнт вертикальної динаміки першого ступеня електропоїзда ЕКр–1 «Тарпан» змінюється від 0,118 до 0,743 за амплітуд 5–15 мм і швидкостей 120–250 км/год, що визначає необхідність обмеження максимальної швидкості. Коефіцієнт вертикальної динаміки другого ступеня залишається в межах допустимого (0,02–0,195), що підтверджує ефективність пневматичної системи ресорного підвішування та її важливу роль у забезпеченні безпеки руху при швидкій експлуатації рухомого складу.

3. Встановлено, що максимально допустима швидкість руху електропоїзда залежить від амплітуди та довжини вертикальних і горизонтальних нерівностей рейкової колії. В порожньому та завантаженому режимах допустима швидкість зменшується зі збільшенням амплітуди нерівностей, а при великих значеннях рух у діапазоні 120–250 км/год заборонений.

Отримані результати підкреслюють необхідність зміни допустимої швидкості для забезпечення безпечної та надійної експлуатації рухомого складу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабак В. П., Куць Ю. В., Мислович М. В., Фриз М., Щербак Л. М. *Об'єктно-орієнтована ідентифікація стохастичних шумових сигналів* : монографія. Київ : Наукова думка, 2024. 240 с. DOI: <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1883-9>
2. Дьомін Р. Ю., Дьомін Ю. В., Черняк Г. Ю., Сергієнко О. В. *Стійкість рухомого складу від сходження з рейок* : монографія. Северодонецьк : СНУ ім. В. Даля, 2022. 232 с. URL: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/454>

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

3. ДСТУ EN 13848 - 1:2022. *Залізничний транспорт. Колія. Якість геометрії колії. Частина 1. Геометричні параметри колії* (EN 13848 - 1:2019, IDT). [Чинний від 2024-12-31]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024.
4. ДСТУ EN 14363:2019. *Залізничний транспорт. Випробування та моделювання для прийняття ходових характеристик залізничних транспортних засобів. Бігова поведінка та стаціонарні випробування*. [Чинний від 2020-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020.
5. Кузишин А. Я., Ковальчук В. В., Соболевська Ю. Г. Просторова математична модель динамічної поведінки сучасного рухомого складу в умовах швидкісного руху. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 4(108). С. 55–66. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/318409>
6. Кузишин А. Я., Костриця С. А., Соболевська Ю. Г., Батіг А. В. Світовий досвід створення математичних моделей пневматичної ресори: переваги та недоліки. *Наука та прогрес транспорту*. 2021. № 4(94). С. 25–42. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/245974>
7. Мямлин С. В. *Моделирование динамики рельсовых экипажей* : монографія. Днепропетровск : «Новая идеология», 2002. 240 с.
8. Панченко С. В., Бабаєв М. М., Блиндюк В. С., Нерубацький В. П. *Конструкція та динаміка електричного рухомого складу* : підручник. Харків : УкрДУЗТ, 2018. Ч. 1. 280 с.
9. Ткаченко В., Сапронова С., Брайковська Н., Твердомед В. *Динамічна взаємодія рухомого складу і колії на лініях швидкісного руху суміщеного з вантажним* : монографія. Вінниця : ГО «Європейська наукова платформа», 2021. 240 с. DOI: <https://doi.org/10.36074/dvrsklshrsv-monograph.2021>
10. Ткаченко В. П., Сапронова С. Ю., Фомин О. В., Кульбовський І. І., Зуб Є. П. *Опір руху і керованість рейкових екіпажів* : монографія. Київ : Вид-во ДУІТ, 2017. 188 с.
11. Bruni S., Vinolas J., Berg M., Polach O., Stichel S. Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamics context. *Vehicle System Dynamics*. 2011. Vol. 49, Iss. 7. P. 1021–1072. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2011.586430>
12. Choi S. Identifying Parametric Models Used to Estimate Track Irregularities of a High-Speed Railway. *Machines*. 2023. Vol. 11, Iss. 1. P. 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11010006>
13. Kuzyshyn A., Sobolevska J., Kostritsa S., Batig A., Boiarko V. Mathematical modeling of the second stage of spring suspension of high-speed rolling stock. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2684, Iss. 1. Art. 020007. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0120402>
14. Oppenheim A. V., Schaffer R. W. *Discrete-Time Signal Processing*. Upper Saddle River, NJ : Pearson, 2010. 1108 p.
15. Papoulis A., Pillai S. U. *Probability, random variables, and stochastic processes*. New York : Tata McGraw-Hill, 2002. 852 p.
16. Xin L., Xu L., Zhang J., Pei M., Mao J., Wang D. Research on characterization methods for track irregularities. *Railw. Eng. Sci.* 2026. Vol. 34, Iss. 1. P. 25–39. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-024-00367-z>
17. Zeng Y., Núñez A., Li Z. A Simulation Study on Characterizing Transfer Functions of Railway Tracks Using Train-Borne Laser Doppler Vibrometer. *Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures. EVACES 2023. Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol. 432. P. 183–192. Cham: Springer, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-39109-5_19
18. Zeng Y., Núñez A., Li Z. Railway sleeper vibration measurement by train-borne laser Doppler vibrometer and its speed-dependent characteristics. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2024. Vol. 39, Iss. 16. P. 2408–2426. DOI: <https://doi.org/10.1111/mice.13150>

A. YA. KUZYSHYN^{1*,2}

^{1*}Dep. «Railway Transport», Lviv Polytechnic National University, S. Bandery St., 12, Lviv, Ukraine, 79000, tel.+38 (032) 267 99 74, e-mail andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-3012-5395

²Lviv Research Institute of Forensic Science, Lypynskyi St., 54, Lviv, Ukraine, 79024, tel.+38 (032) 231 76 13, e-mail andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua, ORCID0000-0002-3012-5395

Investigation of the Vertical Dynamics of the EKr–1 «Tarpan» Electric Train Under High-Speed Operating Conditions

Purpose. To determine the performance indicators of the vertical dynamic behavior of the EKr–1 «Tarpan» electric train under the influence of random railway track irregularities on a straight track section at operating speeds of up to 250 km/h. **Methodology.** The study employs a comprehensive three-dimensional mathematical model of the EKr–1 «Tarpan» electric train in interaction with the railway track, which incorporates a thermodynamic model of the pneumatic suspension system. The model consists of a system of 54 differential equations. Railway track irregularities are modeled as a random process and generated by applying white noise followed by filtering with a Butterworth filter, which ensures the specified spectral characteristics in terms of wavelength and amplitude. As indicators of the dynamic performance of the rolling stock, the coefficients of vertical dynamics of the primary and secondary suspension stages, as well as the vertical accelerations of the car body, are investigated. The vertical dynamic coefficients are determined based on the forces arising in the suspension system. **Findings.** The relationships between the coefficients of vertical dynamics of the primary and secondary suspension stages and the maximum values of the car body vertical acceleration as functions of operating speed have been obtained. These relationships exhibit a nonlinear behavior, on the basis of which the maximum permissible operating speeds of the EKr–1 «Tarpan» electric train under the specified railway track maintenance conditions have been determined. The dynamic performance indicators of the high-speed EKr–1 «Tarpan» electric train were obtained for both tare (empty) and gross (loaded) vehicle conditions. **Originality.** Based on an improved comprehensive mathematical model describing the dynamic behavior of high-speed rolling stock–track interaction, theoretical values of dynamic performance indicators have been substantiated for operating regimes representative of service conditions, taking into account the rolling stock design features, wheel–rail interaction conditions, and operating speeds of up to 250 km/h. **Practical value.** The obtained dynamic performance indicators of the EKr–1 «Tarpan» electric train, as well as the established maximum permissible operating speeds, can be used to substantiate the conditions for its safe operation in high-speed service regimes. The results of the study are advisable for application in the design, modernization, and improvement of suspension systems of high-speed rolling stock, as well as in the development of regulatory and operational documentation.

Key words: high-speed rolling stock; dynamic performance indicators; mathematical model; railway track; structural constraints; vibrations

REFERENCES

1. Babak, V. P., Kuts, Yu. V., Myslovykh, M. V., Fryz, M., & Shcherbak, L. M. (2024). *Object-oriented identification of stochastic noise signals* : monografiya. Kyiv: Naukova dumka. DOI: <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1883-9> (in Ukrainian)
2. Domin, R. Yu., Domin, Yu. V., Cherniak, G. Yu., & Serhiienko, O. V. (2022). *Stability of the rolling stock against derailment*: monografiya. Sievierodonetsk : SNU im. V. Dalia. Retrieved from <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/454> (in Ukrainian)
3. *Zaliznychnyi transport. Koliia. Yakist heometrii kolii. Chastyna 1. Heometrychni parametry kolii (EN 13848 - 1:2019, IDT), DSTU EN 13848 - 1:2022.* (2024). (in Ukrainian)
4. *Zaliznychnyi transport. Vyprobuvannia ta modeliuvannia dlia pryiniattia khodovykh kharakterystyk zaliznychnykh transportnykh zasobiv. Bihova povedinka ta statsionarni vyprobuvannia, DSTU EN 14363:2019.* (2020). (in Ukrainian)
5. Kuzyshyn, A. Y., Kovalchuk, V. V., & Sobolevska, Y. H. (2024). A Spatial Mathematical Model of the Dynamic Behavior of Modern Rolling Stock in High-Speed Traffic. *Science and Transport Progress*, (4(108)), 55-66. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/318409> (in Ukrainian)
6. Kuzyshyn, A. Y., Kostriksia, S. A., Sobolevska, Y. H., & Batih, A. V. . (2021). World Experience in Creating Mathematical Models of Air Springs: Advantages and Disadvantages. *Science and Transport Progress*, (4(94)), 25-42. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/245974> (in Ukrainian)
7. Miamlyn, S. V. (2002). *Modelirovaniye dynamiky relsovykh skypazhei* : monografiya. Dnepropetrovsk: «Novaia ydeolohiya». (in Russian)
8. Panchenko, S. V., Babaiev, M. M., Blyndiuk, V. S., & Nerubatskyi, V. P. (2018). *Konstruktziia ta dynamika elektrychnoho rukhomoho skladu.* (Vol. 1). Kharkiv: UkrDUZT. (in Ukrainian)
9. Tkachenko, V., Sapronova, S., Braikovska, N., & Tverdomed, V. (2021). *Dynamic interaction of rolling stock and track on lines of speed motion combined with freight* : monografiya. Vinnytsia: European Scientific Platform. DOI: <https://doi.org/10.36074/dvrsklshrsv-monograph.2021> (in Ukrainian)

10. Tkachenko, V. P., Sapronova, S. Yu., Fomyn, O. V., Kulbovskiy, I. I., & Zub, Ye. P. (2017). *Opir rukhu i kerovanist reikovykh ekipazhiv : monohrafiia*. Kyiv: Vyd- vo DUIT. (in Ukrainian)
11. Bruni, S., Vinolas, J., Berg, M., Polach, O., & Stichel, S. (2011). Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamics context. *Vehicle System Dynamics*, 49(7), 1021-1072. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2011.586430> (in English)
12. Choi, S. (2023). Identifying parametric models used to estimate track irregularities of a high-speed railway. *Machines*, 11(1), 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11010006> (in English)
13. Kuzyshyn, A., Sobolevska, J., Kostritsa, S., Batig, A., & Boiarko, V. (2023). Mathematical modeling of the second stage of spring suspension of high-speed rolling stock. *AIP Conference Proceedings*, 2684(1), 020007. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0120402> (in English)
14. Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. (2010). *Discrete - Time Signal Processing*. Upper Saddle River, NJ: Pearson. (in English)
15. Papoulis, A., & Pillai, S. U. (2002). *Probability, random variables, and stochastic processes*. New York: Tata McGraw-Hill. (in English)
16. Xin, L., Xu, L., Zhang, J., Pei, M., Mao, J., & Wang, D. (2026). Research on characterization methods for track irregularities. *Railway Engineering Science*, 34(1), 25-39. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-024-00367-z> (in English)
17. Zeng, Y., Núñez, A., & Li, Z. (2023). A Simulation Study on Characterizing Transfer Functions of Railway Tracks Using Train- Borne Laser Doppler Vibrometer. *Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures. EVACES 2023. Lecture Notes in Civil Engineering*, 432, 183-192. Cham: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-39109-5_19 (in English)
18. Zeng, Y., Núñez, A., & Li, Z. (2024). Railway sleeper vibration measurement by train-borne laser Doppler vibrometer and its speed-dependent characteristics. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 39(16), 2408-2426. DOI: <https://doi.org/10.1111/mice.13150> (in English)

Надійшла до редколегії: 29.11.2025

Рекомендовано до публікації: 24.12.2025

Дата публікації: 28.03.2026