

В. О. МЕЛЬНИЧУК (КМУ, Київ), О. М. САВЧУК, М. А. ГРІЧАНІЙ,  
І. Ю. ХОМЕНКО (ДІТ)

## АНАЛІЗ ПОПЕРЕЧНИХ КОЛИВАНЬ КОЛЕСА ВІДНОСНО РЕЙКИ З ВІДЕОЗАПИСІВ

У статті аналізуються відеозаписи руху колеса по рейковій колії, зроблені під час динамічних випробувань вагонів. Обробка включає в себе фіксацію положень обода колеса відносно рейки, побудову сплайн-функції переміщень та її частотної характеристики. Метою аналізу є визначити наявність гармонійних складових у поперечних переміщеннях колеса.

В статье анализируются видеозаписи движения колеса по рельсовой колее, сделанные во время динамических испытаний вагонов. Обработка включает в себя фиксацию положений обода колеса относительно рельса, построение сплайн-функции перемещений и её частотной характеристики. Цель анализа – выявить наличие гармонических составляющих в поперечных перемещениях колеса.

In the article the videotape recordings of wheel motion on rail track, done during the dynamic tests of carriages, are analyzed. The treatment includes fixing of wheel rim positions in relation to a rail, construction of the spline function of displacement and its frequency description. The purpose of analysis is to determine the presence of harmonic components in the transversal wheel displacements.

Стрімкий розвиток систем відеозапису, їх мініатюризація і висока надійність за несприятливих умов використання дають вченим-експериментаторам новий унікальний інструмент фіксації візуальних даних при проведенні ходових динамічних випробувань рухомого складу. При цьому актуальною проблемою є правильність інтерпретації і точність визначення взаємних переміщень частин вагону щодо один одного, а також щодо рейкової колії. Як приклад, розглянемо процедуру визначення величини і частоти поперечних коливань колісної пари в рейковому зазорі, знаючи які, можливо спрогнозувати втрату стійкості руху екіпажу [2, 3] при різних швидкостях.

На сьогоднішній день відомі наступні способи визначення цих величин:

- механічний пристрій для фіксації переміщень «вагон-рейки» типу пружного двокоординатного шарніру [1] (недоліком такого пристрою є фіксування переміщень тільки при низькій швидкості руху вагона, бо він притискається до рейок за допомогою роликів);
- датчик переміщень, встановлений між шкворневою балкою та корпусом букси [4], реєструє поперечні зміщення колісної пари відносно кузова, але він дає приблизну інформацію щодо взаємних переміщень пари «колесо-рейка», оскільки база відліку (шкворнева балка кузова) сама піддається складним просторовим коливанням;

- датчик кутових переміщень надресорної балки візка відносно кузова, який використовуються для реєстрації виляння візка, але він працює нестабільно через малість вимірюваних кутів поворотання.

Всі вищеперелічені методи мають свої недоліки, що впливають на правильність інтерпретації результатів вимірювань.

Але у теперішній час нескладно провести, без обмежень на швидкість і умови руху вагону, відеозйомку пари «колесо-рейка», яка дає можливість візуально оцінити характер динамічних процесів, що проходять. Для правильності інтерпретації отриманих відеозаписів (усунення накладок від коливань камери і колеса) використовуємо наступну методу.

Для визначення процесу зміни відстані  $y_i$  (рис. 1) між зовнішньою гранню головки рейки і гребеневою гранню обода колеса застосуємо функцію:

$$y_i = F(t_i), \quad (1)$$

де  $t_i$  — момент зйомки  $i$ -того кадру відеозапису.

За умови, що відеозапис зроблений з нормальною частотою  $f_0 = 12,5$  Гц (відповідно, період розкадровки  $T = 0,08$  с) і оброблюється покадрово, то функція (1) буде представлена у вигляді матриці:

$$E = \begin{bmatrix} t_0 & t_0 + T & t_0 + 2T & \dots & t_0 + (n-1)T \\ y_1 & y_2 & y_3 & \dots & y_n \end{bmatrix}. \quad (2)$$

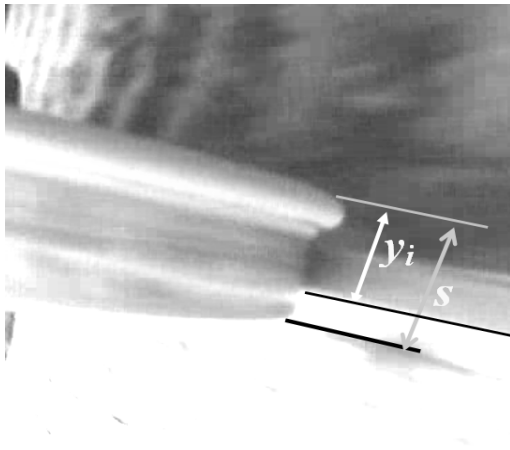


Рис. 1. Кадр із відеозаписом

Побудувати матрицю  $E$  автоматично шляхом розпізнавання відповідних об'єктів на відеокадрах поки неможливо, тим більше, що коливання камери дещо змінюють положення рейки у кожному кадрі. Тому формування  $E$  виконувалось у наступному порядку:

**На першому етапі** за допомогою стандартних програм (Virtual Dub, Windows Movie Maker та ін.) необхідно провести розкадровку відеозапису на окремі кадри та пронумерувати ці кадри у відповідності до шкали часу  $t_i$ .

**На другому етапі** за допомогою стандартних програм (Microsoft Foto Editor, Photoshop та ін.) кожен кадр розкадровки відеозапису повертаємо на такий кут, щоб пара «колесо-рейка» зайняла суворо вертикальне (чи горизонтальне) положення, що дасть змогу уникнути ефекту коливань камери відносно площини колеса. Надалі виділяємо фрагмент між гранями рейки та колеса, та вираховуємо розмір  $y_i$  (рис. 2) (для визначення масштабного коефіцієнту виконуємо замір повної ширини обода колеса та перерахунок розмірності «піксель» в міліметр).

**На третьому етапі** формуємо масив даних  $E$  методом розміщення значень  $t_i$  та  $y_i$  у формі двовірної матриці. Імпортувавши матрицю  $E$  (розміром  $2 \times n$ ) у програму MATLAB, з'єднаємо послідовно усі значення  $y_i$  плавною сплайн-функцією (відрізками кубічних парабол, що проходять через задані точки) та отримуємо амплітудну функцію  $X$ . Останню за допомогою перетворення Фур'є перетворюємо в спектральну щільність коливань пари «колесо-рейка».

Відпрацювання приведеної методики проводилось на візцевій функції:

$$y_i = 110 + 25\sin 2\pi(1,5t_i), \quad (5)$$

що була задана матрицею  $E_1$  через інтервал  $\Delta t = 0,08$  с загальним числом точок  $n = 135$ . Параметри візцевої матриці подібні одержаним при обробці відеозаписів «колесо-рейка», але вона має єдину частоту коливань  $f = 1,5$  Гц, близьку до автоколивань візка моделі 18-100 порожнього піввагона, що збурюються із втратою стійкості руху.



Рис. 2. Визначення розміру  $y_i$

При формуванні  $E_1$  були умисно внесені «помилки» на 2-й, 3-й, 4-й, 8-й та 11-й секундах – їх видно на побудованій сплайн-функції на рис. 3а (верхній амплітудний графік). Як і припускалось, такі випадкові помилки не позначаються суттєво на частотній характеристиці (нижній графік рис. 3а). Її сплеск вказує на частоту коливань 1,5 Гц із щільністю 22 % (масштаб щільності заданий відносно ста процентів для чистого гармонічного процесу).

Налагоджена на візцевій функції програма обробки була використана для розшифрування еталонного відеозапису коливань пари «колесо-рейка», записаного співпрацівниками ІТМ на полігоні Белореченська – Майкоп. Випробувався піввагон на типових візках мод.18-100 зі зношеними колесами (товщина гребеня 27 мм) з метою дослідження впливу комплексної модернізації візків на ходові якості вагона.

Аналізувалась тільки ліва частина відеозапису (у праву частину відеоролика вмонтовані аналогічні зйомки руху візка, комплексно модернізованого з використанням елементів «А.Стакі» і зносостійкого профілю ІТМ-73). Цей ролик відомий спеціалістам – він демонструвався у доповідях та описаний у джерелах [6].

При перегляді еталонного запису складається враження, що колесо увесь час знаходиться у режимі інтенсивних поперечних автоколивань – через втрату стійкості руху.



Рис. 3. Результати аналізу коливань:  
 а) зрізкової функції; б) еталонного відеозапису коливань візка мод. 18-100 на 9...20 с;  
 с) еталонного відеозапису коливань візка мод. 18-100 на 0...10 с

Швидкість  $V = 70$  км/год для порожнього піввагона із зношеними колесами близька до критичної на прямолінійній колії, але відеоролик знімався і при проходженні криволінійної ділянки радіусом  $R = 650$  м. Із минулих досліджень [5] витікало, що у кривій критична швидкість зростає, – отже на частині відеоролика можливе затухання коливань колеса. Уважний перегляд показав, що після 20-ї секунди від початку ролика помітне затухання виляння. Тому було покадрово оброблено два фрагменти відеоролика:

**I фрагмент** – від  $t = 19,2$  с до  $t = 32,6$  с – матриця  $E_2$ , характеристики див. на рис. 3б;

**II фрагмент** – від  $t = 0,2$  с до  $t = 10,2$  с – матриця  $E_3$ , характеристики див. на рис. 3с.

З частотних характеристик видно, що у фрагменті II домінує єдина частота  $f_a = 1,67$  Гц (із щільністю спектру 3 %).

При експериментальних дослідженнях виляння частин піввагона, що втратив стійкість руху, була визначена частота автоколивань близько 1,5 Гц [4]. Це свідчить про наявність на фрагменті II еталонного відеозапису автоколивань колісної пари поперек рейкової колії, – отже втрата стійкості руху підтвердилась.

Щодо фрагменту I, то тут домінують три низькі частоти  $f_1 = 0,87$  Гц та  $f_2 = 0,95$  Гц (із щільністю спектру 0,13 %), а також  $f_3 = 1,04$  Гц (із щільністю спектру 0,21 %), а на частоті  $f_a$  можна побачити мізерний сплеск із щільністю 0,03 %.

Обробка еталонного відеозапису за викладеною методикою дозволила визначити наступне:

- критерієм збурення поперечних автоколивань колісної пари у рейковому зазорі є наявність сплеску частоти  $f_a = 1,5...2$  Гц (в результаті аналізу одержано  $f_a = 1,67$  Гц) зі щільністю спектру  $\approx 3$  %;

- відсутність або незначна щільність сплеску частоти  $f_a$  за наявності домінуючих сплесків більш низьких частот  $f' < f_a$  свідчить, що автоколивання погашені, внаслідок входу вагона у криволінійну ділянку колії.

Описана процедура використовувалась також для оцінки стійкості руху піввагона, відремонтованого за технологією «Дніпро». Розроблена сумісно з ДП «Придніпровська залізниця», вказана технологія ДР вагонів експлуатаційного парку передбачає обладнання візків мод. 18-100 пристроями, що підвищують критичну швидкість порожнього вагона до  $V_{кр} \geq 100$  км/год, тобто вагон здобуває швидкісну категорію «s» за класифікацією UIC.

У процесі динамічних випробувань дослідного піввагона № 66489808 після ремонту за технологією «Дніпро» були виконані відеозйомки під час руху порожнього зчепу зі швидкістю 80, 100 та 132 км/год.

Прикріплена до кінцевої балки кузова, камера знімала положення колеса відносно рейки (див. рис. 1, 2). По цих відео сформовані матриці  $E_4...E_6$ .

Результати аналізу представлені на рис. 4.

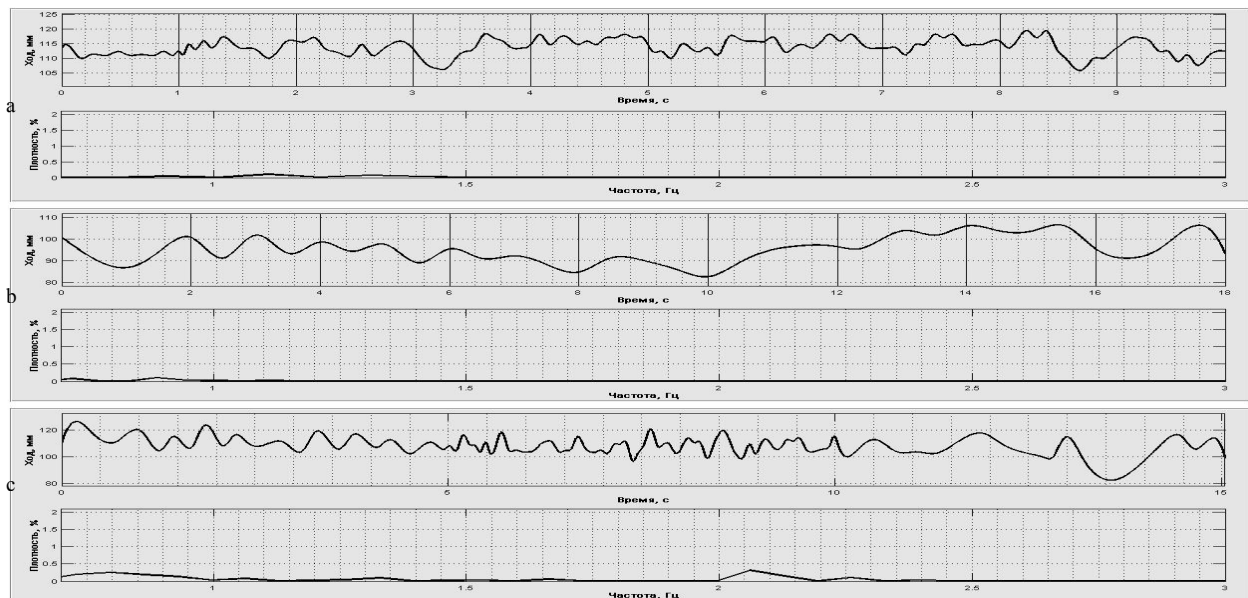


Рис. 4. Результати аналізу відеозаписів коливань «колесо-рейка» дослідного піввагона після ДР за технологією «Дніпро»:

- а) при швидкості  $v = 80$  км/год;
- б) при швидкості  $v = 100$  км/год;
- с) при швидкості  $v = 132$  км/год

Верхні амплітудні характеристики вказують на безперервні переміщення колісної пари у рейковому зазорі в результаті випадкових поперечних збурень. Матриця  $E_4$  побудована з покадровим зніманням розмірів  $y_i$ , тому на рис. 4а коливання представлені детальніше, ніж при  $v = 100$  і  $v = 132$  км/год. Відповідні матриці  $E_5$  і  $E_6$  сформовані з перемінним  $\Delta t = 0,08 \dots 0,56$  с, тобто через 1...6 кадрів відео. При цьому оператор старався не пропустити кадрів з максимальним наближенням (або віддаленням) гребеня до рейки. Виявилось, що апроксимація сплайн-функціями працює і при нерегулярній розкадровці, якщо у  $E$  значення стовпця часу постійно наростають. Природно, що високочастотні гармоніки переміщень частково згладжуються, але індикація автоколиваний не повинна погіршитись, оскільки останні характерні регулярними контактами гребенів коліс то з лівою, то з правою рейками.

Розгляд частотних характеристик, наведених на рис. 4, вказує на наступне:

*- на усіх розглянутих швидкостях руху вагона поперечні автоколивання колеса відносно рейки відсутні (мають рівень із щільністю спектру менш ніж 0,32 %). Отже, рух дослідного вагона стійкий по Ляпунову.*

Цей висновок підтримується результатами аналізу поперечних динамічних зусиль та прискорень, зареєстрованих під час динамічних випробувань вагона.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Измерение динамического профиля пути [Текст]. – В кн.: Некоторые задачи механики скоростного транспорта / В. А. Лазарян и др. – К.: Наук. думка, 1970. – С. 88-94.
2. Автоколебания и устойчивость движения рельсовых экипажей [Текст] / Ю. В. Демин и др. – К.: Наук. думка, 1984. – 160 с.
3. Пшінько, О. М. Підвищення швидкості вантажних поїздів [Текст] / О. М. Пшінько, М. І. Сергієнко, О. М. Савчук // Вагонний парк. – 2007. – № 6. – С. 13-17.
4. Савчук, О. М. Об интенсивном влиянии тележек [Текст] / О. М. Савчук, О. В. Шатунов, Н. А. Гричаный // Ж.д. транспорт (РФ). – 2003. – № 3. – С. 44-45.
5. Мельничук, В. О. Проблема підвищення швидкості вантажних поїздів [Текст] / В. О. Мельничук, О. М. Пшінько, О. М. Савчук // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 22. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 40-45.
6. Комплексная модернизация ходовых частей грузовых вагонов [Текст] / В. Ф. Ушкалов и др. // Вагонний парк. – 2007. – № 2. – С. 18-22.

Надійшла до редколегії 23.03.2010.

Прийнята до друку 07.04.2010.