

М. П. Сисин¹, Я. В. Болжеларський¹, В.З. Станкевич¹

Оцінка стійкості рейко-шпальної решітки розпиранню рухомим складом

У статті приведено результати дослідження явища сходу з рейок рухомого складу внаслідок процесу розпирання залізничної колії. Для цього було розроблено модель динамічної взаємодії колії з рухомим складом у горизонтальній площині. Вона представлена континуальною балковою системою розподілених мас та жорсткостей на пружній основі, яка має згинальні та крутні переміщення, та дискретною рухомою масою, що відображає необресорену частину екіпажу. За допомогою моделі виконано дослідження впливу несправностей підрейкових опор та вузлів скріплень, а також горизонтальних нерівностей колії на горизонтальні віджимні рейки. Встановлено залежність максимальної критичної сили, що необхідна для розпирання колії, від стану опор підрейкової основи, кількості дефектних шпал, швидкості руху.

Ключові слова: горизонтальні деформації рейки, стан опор підрейкової основи, динамічна взаємодія колії з рухомим складом, горизонтальні нерівності колії.

Н. П. Сысин, Я. В. Болжеларский, В. З. Станкевич

Оценка устойчивости рельсо-шпальной решётки распиранию подвижным составом

В статье приведены результаты исследования схода с рельсов подвижного состава вследствие процесса распирания железнодорожного пути. Для этого была разработана модель динамического взаимодействия пути с подвижным составом в горизонтальной плоскости. Она представлена континуальной балочной системой распределенных масс и жесткостей на упругом основании, которая имеет изгибочные и крутящие перемещения, и дискретной движущейся массой, которая является необресоренной частью экипажа. С помощью модели выполнены исследования влияния неисправностей подрельсовых опор

¹ Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз (ЛНДІСЕ), Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДПТ).

и узлов креплений, а также горизонтальных неровностей пути на горизонтальные отжимы рельсов. Установлена зависимость максимальной критической силы, необходимой для распирания пути, от состояния опор подрельсового основания, количества дефектных шпал, скорости движения.

Ключевые слова: горизонтальные деформации рельса, состояние опор подрельсового основания, динамическое взаимодействие пути с подвижным составом, горизонтальные неровности пути.

M. P. Sysyn, Y. V. BolzhelarSKIY, V. Z. Stankevych

Evaluation of track stability against rail tilting by rolling stock

The article presents the results of studying the rolling stock derailment during rail tilting process. For this purpose a model of rolling stock and railway track dynamic interaction in a horizontal plane was developed. It is represented by the continual beam system of distributed mass and stiffness on elastic foundation. The beam has bending and torsional transitions, and discrete moving mass, which is part of unsprung mass. With the help of the model were performed the research of the effect of faults of underrail supports and fastenings, and the influence of horizontal track irregularities on horizontal rail spin. The dependence of the maximum critical force for rail tilting was found.

Key words: horizontal rail deformation, underrail basis condition, track and rolling stock dynamic interaction, horizontal track irregularities.

Проблема та її актуальність. Дослідження стійкості рейко-шпальної решітки проти розпирання колесами рухомого складу пов'язане із актуальними практичними задачами встановлення причин виникнення залізнично-транспортних подій та забезпечення умов попередження їх виникнення.

На даний час дослідження роботи рейок у горизонтальній площині переважно стосуються роботи справних та працездатних конструкцій колії під дією справного рухомого складу. В дійсності більшість конструкцій колії знаходяться в технічному стані, що є відмінним від проектного стану, а також у частково-працездатному стані із обмеженням швидкостей руху поїздів. Стійкість конструкції залізничної колії на дерев'яних шпалах проти горизонтального віджимання колесами рухомого складу значно впливає на безпеку руху поїздів, особливо при несприятливій дії рухомого складу у поєднанні з погіршеним станом за-

лізничної колії. На роботу рейки у горизонтальній площині під дією бокової сили впливає низка факторів, а саме: швидкість проходження рухомого складу, наявність на ділянці гнилих шпал та їх кількість, наявність нерівності та її величина, а також суміщення всіх цих факторів разом.

Дослідженням роботи рейки у горизонтальній площині присвячено роботи багатьох авторів, таких як Тимошенко С. П., Вериго М. Ф., Коган А. Я., Лисюк В. С., Сокол Е. М., Певзнер В. О., Ромен Ю. С. [1–7]. Однак, як правило, ці дослідження торкалися роботи колії у стані нормальної експлуатації, при якій розрахункові моделі роботи рейки під навантаженням спрощуються і не враховують низки факторів. Це призводить до того, що при дослідженні роботи колії у граничному стані із застосуванням традиційних моделей результати розрахунків віджимання рейки не збігаються із результатами експериментальних досліджень [2]. У дослідженнях таких авторів, як Сокол Е. М. та Лисюк В. С. [1–2] враховано важливі фактори роботи рейки під горизонтальним навантаженням, а саме, сумісну роботу рейки на горизонтальний вигин та кручення. Разом з цим ще не дослідженими залишається ряд питань, таких як:

- вплив наявності «кущів» гнилих шпал, їх кількості та характеру роботи окремих шпал у «кущі»;
- наявність динамічної взаємодії рейки на кручення і вигин та колеса у горизонтальній площині при проходженні колесом горизонтальної нерівності.

Модель динамічної взаємодії колії та рухомого складу. Під дією вертикальних та горизонтальних сил, що передаються від надресорної будови вагона через колісні пари, в рейках виникають горизонтальні і вертикальні деформації. При цьому динамічна ширина рейкової колії в окремих випадках може значно перевищувати її нормативне статичне значення і призвести до провалювання одного з коліс колісної пари в міжрейковий простір [1–5]. Для зігнутої осі прямолінійної балки на пружній основі Вінклерівського типу зазначені деформації описуються системою виведених проф. Тимошенко С. П. взаємозв'язаних диференціальних рівнянь [6]. У даній роботі для опису динаміч-

ної взаємодії система взаємозв'язаних диференціальних рівнянь авторами Соколом Е. М. [1], Певзнером В. О., Роменом Ю. С. [7] доповнюється відповідними складовими інерційних властивостей та демпфірування у підрейковій основі:

$$\begin{cases} m_y \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} + E J_y \frac{\partial^4 u_z}{\partial x^4} + f_z \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} - \frac{\partial \varphi}{\partial t} h_1 \right) + U_z (u_z - h_1 \varphi) = q_z \\ J_\varphi \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + D_\varphi h_\varphi^2 \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} - C_\varphi \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - f_z \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} - \frac{\partial \varphi}{\partial t} h_1 \right) h_1 - U_z (u_z - h_1 \varphi) h_1 + \\ + f_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial t} + U_\varphi \varphi = q_\varphi \end{cases} \quad (1)$$

де U_z, U_φ – відповідно модулі пружності підрейкової основи по відношенню до горизонтального згину та кручення; h_φ – відстань між центрами ваги підоси і головки рейки; h_1 – відстань від основи підоси рейки до центра кручення її перерізу; E, G – модулі Юнга і зсуву матеріалу рейки; C_z – поперечна горизонтальна жорсткість рейки; F – площа поперечного перерізу рейки; J_Γ, J_Π – осьові моменти інерції перерізів головки і підоси рейки відносно осі Y ; J_y, J_0 – осьовий і полярний моменти інерції перерізу рейки; q_z, q_φ – інтенсивності розподілених сил і моментів; J_φ – момент інерції 1 м рейки відносно центра кручення; f_z – коефіцієнт в'язкого тертя; f_φ – демпфірування основи на кручення; m_y – приведена маса колії для одного погонного метра рейки:

$$C_\varphi = \frac{F^4 G}{4\pi J_0} ; \quad D_\varphi = \frac{J_\Gamma J_\Pi E}{J_\Gamma + J_\Pi} ; \quad U_z = \sqrt[3]{\frac{C_z^4}{64 E J_y}} . \quad (2)$$

Для розрахунку динамічного навантаження на рейки до системи диференціальних рівнянь (1) додаються рівняння коливань необресореної маси, яким враховується нерівність колії. Розділивши перше рівняння на жорсткість $E J_y$, а друге – на $D_\varphi h_\varphi^2$,

система (1) записується у вигляді (3):

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{m_y}{E J_y} \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} + \frac{f_z}{E J_y} \frac{\partial u_z}{\partial t} + \frac{\partial^4 u_z}{\partial x^4} + \frac{U_z}{E J_y} u_z - \frac{f_z h_1}{E J_y} \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \frac{U_z h_1}{E J_y} \varphi = \frac{q_z}{E J_y} \\ & \frac{J_\varphi}{D_\varphi h_\varphi^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + \frac{f_z h_1^2 + f_\varphi}{D_\varphi h_\varphi^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} - \frac{C_\varphi}{D_\varphi h_\varphi^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{U_z h_1^2 + U_\varphi}{D_\varphi h_\varphi^2} \varphi - \frac{f_z h_1}{D_\varphi h_\varphi^2} \frac{\partial u_z}{\partial t} - \\ & \quad - \frac{U_z h_1}{D_\varphi h_\varphi^2} u_z = \frac{q_\varphi}{D_\varphi h_\varphi^2} \\ & M_k \frac{d^2 z_k}{dt^2} + f_{hz} \left(\frac{dz_k}{dt} + \frac{dy_{\text{неп}}}{dt} - \frac{du_z}{dt} - \frac{d\varphi}{dt} (h_2 + y_1) \right) + \\ & \quad + C_{hz} (z_k + y_{\text{неп}} - u_z - \varphi (h_2 + y_1)) = P_\delta \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Тут z_k – невідома траєкторія руху необресореної маси; $y_{\text{неп}} = f(v \cdot t)$ – горизонтальна нерівність вздовж рейки; v – швидкість руху рухомого складу; $C_{hz} = \text{const}$ – точкова жорсткість контакту; M_k – необресорена маса рухомого складу; $f_{hz} = \text{const}$ – демпфірування у точці контакту колеса і рейки в горизонтальній площині.

Для розв'язку даної системи диференційних рівнянь виконується їх інтегральне представлення Фур'є за часом t із подальшим їх скінченно-різницеvim поданням. Формулюючи початкові та граничні умови, виконується числовий розв'язок системи диференційних рівнянь та моделювання проходження необресореною масою геометричної та силової нерівності підрейкової основи. На рис. 1 та 2 показано результати моделювання для вихідних даних, що відповідають колії із рейками типу Р65 на дерев'яних шпалах зі скріпленням ДО під навантаженнями завантаженого 4-вісного піввагона при швидкості руху 25 км/год. Поза межами нерівності на колію від рухомого складу діє горизонтальне навантаження, що відповідає кривій ділянці колії. Несправності колії представлено геометричною нерівністю та несправністю підрейкової основи – «кущем» гнилих шпал. Для

даних несправностей на *рис. 2* показано прогини рейки за рахунок згину і кручення та горизонтальні сили дії на колію. На *рис. 3* показано деформації поперечного перерізу рейки після проходження колесом несправностей колії.

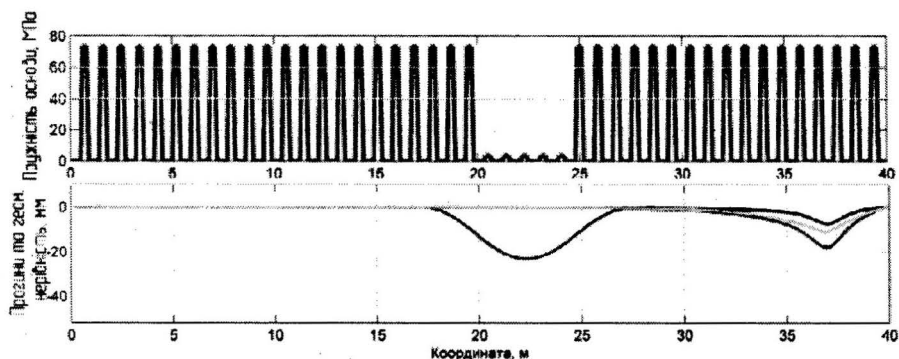


Рис. 1. Моделювання проходження необресованою масою геометричної та силової нерівності підрейкової основи

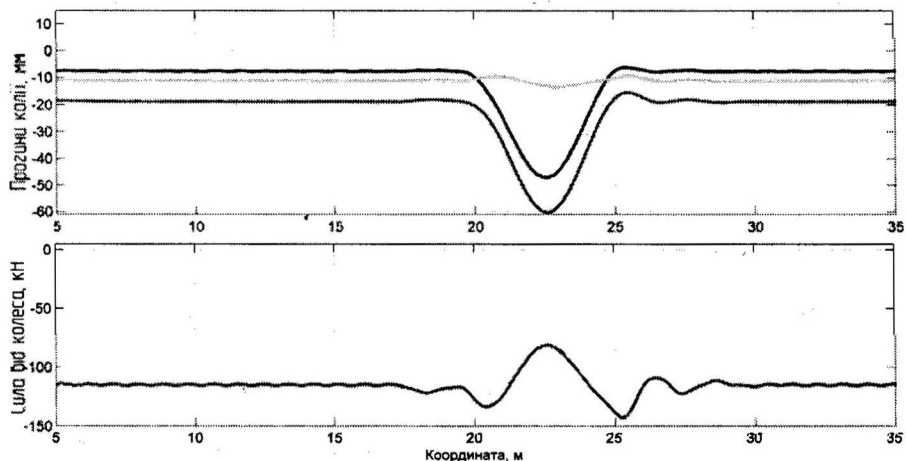


Рис. 2. Прогини рейки за рахунок згину і кручення та горизонтальні сили дії на колію

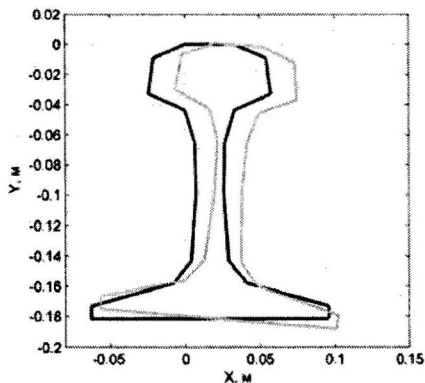


Рис. 3. Деформації поперечного перерізу рейки після проходження колесом несправностей колії

Дослідження впливу несправностей колії на горизонтальні деформації під колесами рухомого складу. За критерій оцінки стійкості рейко-шпальної решітки вибирається максимальна горизонтальна бокова сила колеса (критична сила) на рейку, при якій відбувається розпирання колії. Досліджується залежність цієї сили від кількості гнилих шпал у «кущі», наявності комбінованого впливу горизонтальної нерівності, швидкості руху поїздів. Результати дослідження показано на рис. 4.

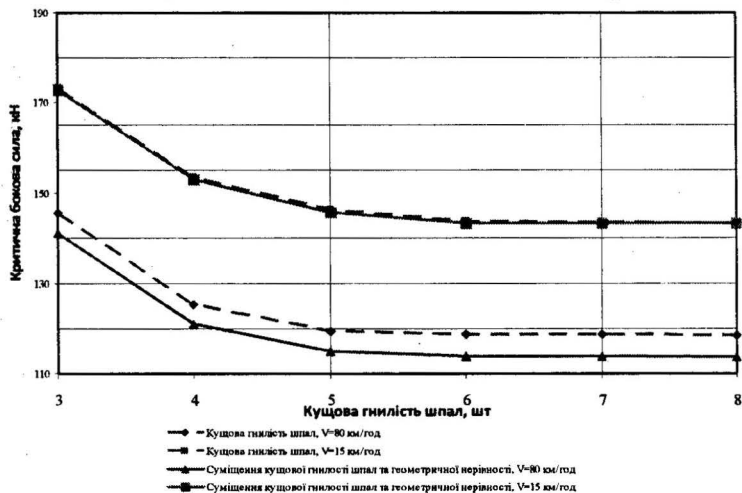


Рис. 4. Залежність бокової сили, що призводить до розконтровки колії, від гнилих шпал та від суміщення гнилих шпал і нерівності при $V=15$ км/год та $V=80$ км/год

Висновки. З проведеного дослідження отримуються наступні висновки. Збільшення швидкості рухомого складу приводить до значного зменшення величини бокової сили, що необхідна для розпирання колії. Вплив горизонтальної геометричної нерівності колії на значення критичної бокової сили при малих швидкостях є незначним, оскільки при слідуванні рухомого складу з малими швидкостями динамічна сила, яка виникає при проходженні нерівності, близька до нуля. Між кількістю гнилих шпал та боковою силою, що призводить до розкантировки колії, має місце обернено-пропорційна залежність: зі збільшенням кількості гнилих шпал у «кущі» зменшується значення бокової сили, необхідної для розпирання колії. При збільшенні кількості непридатних шпал у «кущі» понад 5 шт. підряд критична бокова сила майже не зменшується. Найменше значення бокової сили, що призводить до розкантировки колії, виникає при несприятливому накладанні несправностей геометричного стану колії та стану опор підрейкової основи.

Summary. From the study the following conclusions are obtained. Rolling stock speed increase leads to a significant decrease of the lateral force required for rail tilting. Effect of horizontal geometric irregularity on the value of critical lateral force at low speeds is small. Dynamic force that occurs during rolling stock passing through the irregularity at low speeds is close to zero. Between the number of deteriorated sleepers and lateral force, which leads to rail tilting, there is an inverse relationship: the greater number of deteriorated sleepers in a row, the lower the value of lateral force is. When the number of deteriorated sleepers in a row is over 5 pcs., critical lateral force hardly reduces. The lowest value of lateral force, which leads to rail tilting appears at unfavorable combination of track geometry faults and underrail basis condition.

1. Сокол Э. Н. Сходы с рельсов и столкновения подвижного состава (Судебная экспертиза. Элементы теории и практика). К.: Транспорт Украины, 2004. – 367 с.
2. Лысюк В. С. Причины и механизм схода колеса с рельса. Проблемы износа колес и рельсов. – [2-е изд. перераб и доп.]. – М.: Транспорт, 2002. – 215 с.

3. *Вериго М. Ф.* Взаимодействия пути и подвижного состава / Вериго М. Ф., Коган А. Я. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.
4. *Станкевич В. З.* Визначення динамічного розширення рейкової колії у кривій ділянці // *Залізничний транспорт України.* – № 1. – 2012. – С. 15 – 17.
5. *Fendrich L.* Handbuch Eisenbahninfrastruktur / Lothar Fendrich. – Springer, 2007. – 990 p.
6. *Timoshenko S.* Method of Analysis of Statical and Dynamical Stresses in Rail. – [Proc. of the 2-d International Congress for Appl. Mechanics]. Zurich, 1927. – 12 p.
7. *Певзнер В. О.* Основы разработки нормативов содержания пути и установления скоростей движения / Певзнер В. О., Ромен Ю. С. // Науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ». – М.: Интекст, 2013. – 224 с.