

М.П. СИСИН, аспірант
В.В. РИБКІН, д-р техн. наук, професор
О.М. ПАТЛАСОВ, канд. техн. наук, доцент
ДНУЗТ (Україна)

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ КОЛИВАНЬ БАЛКИ НА ПРУЖНІЙ ДИСИПАТИВНІЙ ОСНОВІ ПІД ДІЄЮ РУХОМОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ПРОХОДЖЕННІ СИЛОВОЇ НЕРІВНОСТІ КОЛІЇ

У даній статті розглядається модель залізничної полотнини, що являє собою балку на пружній інерційній підставі під впливом квазістатичного навантаження, що рухається. Дослідження цієї моделі проводиться в умовах руху навантаження на колію з неоднорідністю гнучкості основи під рейками.

В данной статье рассматривается модель железнодорожного полотна, которая представляет собой балку на упругом инерционном основании под воздействием движущейся квазистатической нагрузки. Исследование этой модели проводится в условиях движения нагрузки на пути с неоднородностью гибкости основы под рельсами.

A railway track model is considered in this paper. The model is a beam on elastic inertial basis with variable longitudinal elasticity under the influence of moving quasistatic loading. The investigation of the model is carried out on conditions that the loading moves on the track with the inhomogeneity of basis elasticity under the rail.

У теперішній час існує велика кількість моделей, які описують взаємодію колії та рухомого складу [1, 2, 6, 7]. Однак більшість з них описують поведінку залізничної колії не досить адекватно внаслідок спрощень у розрахунковій схемі колії. Основними спрощеннями є:

- зведення колії до лінійної системи з однією або кількома ступенями свободи та постійними жорсткістю і демпферною характеристиками;
- неврахування силової нерівності колії, яка залежить від нерівнопружності вздовж колії, або заміна силової нерівності колії геометричною, яка залежить тільки від статичного навантаження. Дане допущення є важливим, тому що більшість нерівностей залізничної колії, внаслідок яких виникають сили інерції, є нерівностями нерівнопружності підрейкової основи, а не геометричними нерівностями;
- лінійна жорсткість підрейкової основи;
- неврахування взаємодії мас екіпажа через залізничну колію. Взаємодія мас екіпажа через залізничну колію має велике значення для мас, які розміщені на невеликій відстані одна від одної (колесні пари візка) та при великій швидкості руху;
- динамічні характеристики жорсткості підрейкової основи.

Метою даної роботи є оцінка впливу силової нерівності на напружено-деформований стан

колії. За модель береться модель залізничної колії, яка являє собою балку на пружній дисипативній основі із змінною пружністю вздовж колії під дією рухомого квазістатичного навантаження. Для перевірки цієї моделі проводиться порівняння із результатами експериментальних випробувань, проведених ДНУЗТом. За основну величину для дослідження береться величина прогину колії під точкою дії навантаження.

1 Модель залізничної колії як балки на пружній динамічній дисипативній основі під дією рухомого динамічного навантаження

Основними розрахунковими величинами моделі є деформації та фізичні характеристики колії у вертикальній площині. Модель залізничної колії як балки відображає роботу однієї із рейкових ниток у динаміці. Розрахункову схему балки показано на рис. 1.

Балка приймається скінченної довжини із жорстко защемленими кінцями на всьому періоді часу. Довжина балки вибирається такою, щоб змодельовати весь процес взаємодії рухомого навантаження з балкою із урахуванням відстані затухання коливань, що викликані початковими та кінцевими умовами, і становить 100 м.

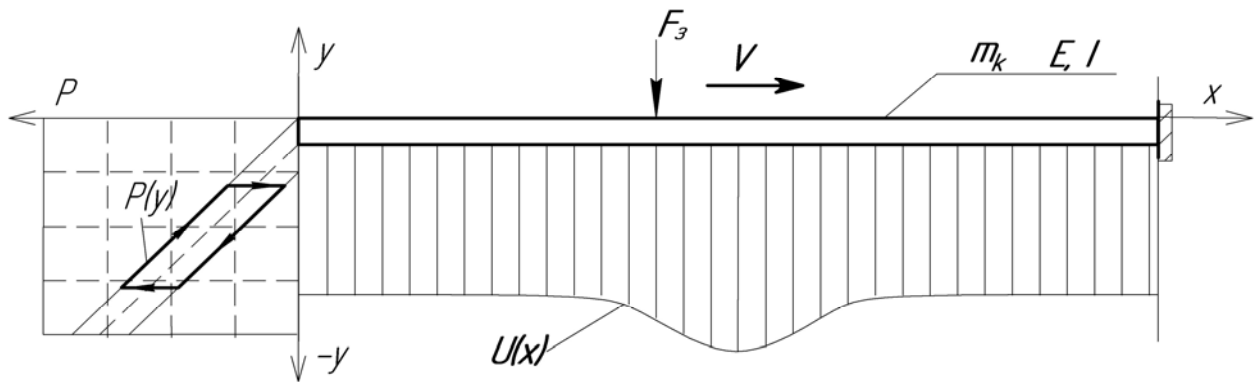


Рис. 1. Розрахункова схема моделі залізничної колії як балки на пружній динамічній дисипативній основі під дією рухомого квазістатичного навантаження

Пружність підрейкової основи враховується як величина змінна вздовж колії. Із множини можливих випадків форми нерівнопружності вибирається найбільш характерна для залізничної колії форма – синусоїдальна нерівнопружність. Як було показано в [1], вона має найбільший вплив на взаємодію колії та рухомого навантаження. Графік зміни вертикальної пружності підрейкової основи вздовж балки показано на рис. 2.

За дисипативні характеристики підрейкової основи приймаються:

- кулонівське тертя;

- тертя, яке пропорційне прогину рейки;
- в'язке тертя:

$$F_{\text{дис}} = \Phi_0 + \varphi \cdot y + f_0 \cdot y', \quad (1)$$

де Φ_0 – постійна сила кулонівського тертя; φ, f_0 – коефіцієнти пропорційності.

Коефіцієнти Φ_0, φ визначаються за вже розробленою методикою, наведеною в роботі [3]. Коефіцієнт в'язкого тертя f_0 представлено в роботі [1]. На рис. 3 показано залежність прогину основи від сили з урахуванням тертя у циклі навантаження.

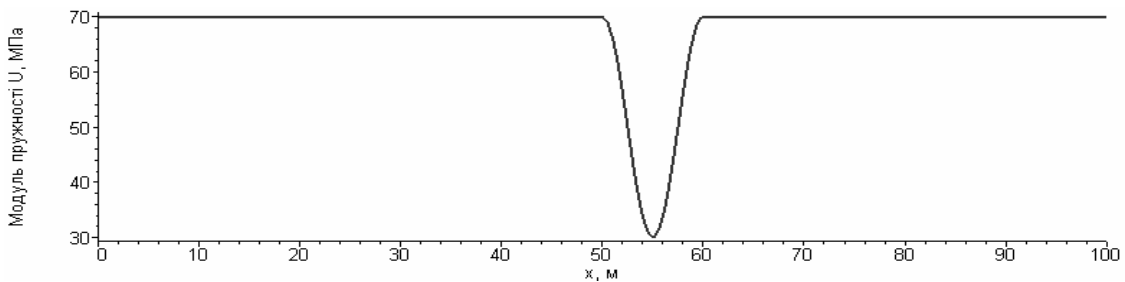


Рис. 2. Графік зміни вертикальної пружності підрейкової основи

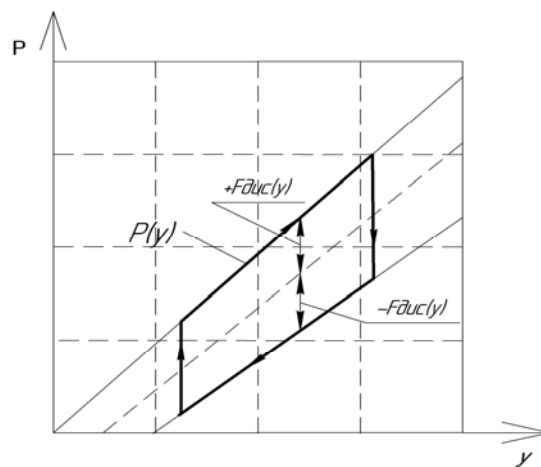


Рис. 3. Залежність прогину основи від сили з урахуванням тертя у циклі навантаження

Маса колії, яка враховує маси всіх її елементів, приймається зосередженою в рейці рівнорозподіленою по довжині.

Зовнішнє точкове навантаження подано квазістатичним, рівнорозподіленим навантаженням на малій довжині ℓ_F (2).

$$F_3(x, t, V) = \begin{cases} 0, & Vt \geq x \\ q_{ст}, & Vt \leq x \leq Vt + \ell_F, \\ 0, & Vt + \ell_F \leq x \end{cases} \quad (2)$$

де $q_{ст}$ – рівнорозподілене статичне навантаження на довжині ℓ_F ;

$$q_{ст} = \frac{F_{ст}}{\ell_F}, \quad (3)$$

$F_{ст}$ – зовнішнє точкове навантаження.

Даній моделі відповідає диференціальне рівняння у частинних похідних, яке являє собою лінійне диференціальне рівняння із змінними коефіцієнтами:

$$EI_y \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + U(x)y(x, t) + m \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} + f_0 \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} + \text{sign}\left(\frac{\partial y(x, t)}{\partial t}\right)(\Phi_0 + \phi \cdot y(x, t)) = F_3, \quad (4)$$

де E , I_y – модуль пружності рейкової сталі та момент інерції рейки; $U(x)$ – функція зміни модуля пружності підрейкової основи вздовж колії; m – приведена маса колії.

Сили кулонівського тертя та тертя, що залежить від прогину, завжди напрямлені проти руху і тому мають знак швидкості.

Граничні та початкові умови, які використовуються для знаходження частинного розв'язку диференціального рівняння, виводяться із таких міркувань:

- у будь-який момент часу кінці балки є нерухомими, тобто при $x=0$ та $x=L$

$$y(x, t) = 0 \quad \text{та} \quad \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} = 0; \quad (5)$$

- у початковий момент часу вісь балки займає нульове положення та є нерухомою, тобто при $t=0$

$$y(x, t) = 0 \quad \text{та} \quad \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} = 0. \quad (6)$$

Такі граничні умови вибрано, оскільки вони є найпростішими, однак при цьому довжину балки потрібно збільшити на величину, необхідну для стабілізації коливань, які виникають внаслідок цих умов.

2. Розв'язок диференціальних рівнянь та дослідження за допомогою розробленої моделі

Побудована модель дає змогу змодельовати процес взаємодії колії та рухомого навантаження при проходженні ним силової нерівності з різними швидкостями, різною формою нерівності, різноманітними фізичними та геометричними характеристиками колії та рухомого навантаження.

Розв'язок диференціального рівняння (4) проводиться за допомогою методу кінцевих різниць при рівномірній сітці та п'ятиточковій різничній схемі [5, 6].

Дослідження взаємодії колії та рухомого навантаження виконується для різних швидкостей руху. До розрахунку береться навантаження, яке відповідає навантаженню від локомотива ВЛ10 із статичним навантаженням 115 кН. Навантаження починає рухатися з точки на відстані 5 м від початку балки для врахування впливу защемлення на її кінці. Приведена маса колії приймається при залізобетонних шпалах 708 кг/м [7]. За форму нерівнопружності підрейкової основи береться ізольована синусоїдальна нерівність з мінімальним та максимальним модулем пружності 30 МПа та 70 МПа відповідно. Довжина нерівнопружності приймається для розрахунку 10 м. Результат розрахунку у вигляді графіків залежності прогину під точкою дії сили від координати сили показано на рис. 4.

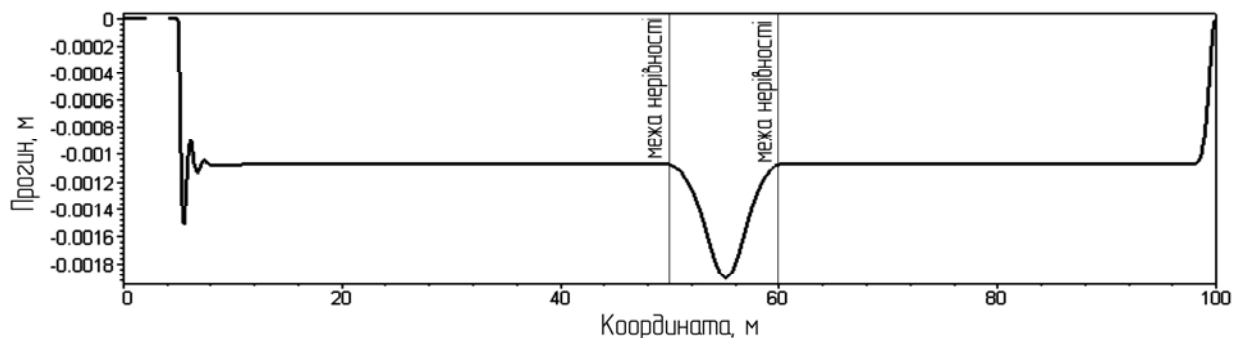


Рис. 4. Графік залежності прогину під точкою дії сили від координати при швидкості руху 60 км/год

Як можна побачити на рис. 4, ліва частина графіка показує стабілізацію коливань, які викликані початком руху із положення з нульовим прогином, що задане граничними умовами (6). На правому кінці балки можна побачити різке зменшення прогину, що відповідає жорсткому защемленню балки, яке описано граничними умовами (5).

Проводяться два види дослідження запропонованої моделі:

- дослідження впливу швидкості руху на прогин під точкою дії сили;
- дослідження впливу швидкості рухомого навантаження на прогин при різних приведених масах колії.

Для дослідження впливу швидкості руху на силову нерівність вибрано ті самі умови, що й для попереднього розрахунку. На рис. 5 показано графіки силової нерівності при швидкостях від 20 до 200 км/год. Як видно із графіка, при збільшенні швидкості руху зовнішнього навантаження збільшується величина силової нерівності та змінюється її форма. Окрім збільшення силової нерівності також збільшується прогин колії у на ділянці балки з однаковою пружністю підрейкової основи. Для пояснення цього проводиться наступне дослідження по впливу швидкості рухомого навантаження на прогин при різних приведених масах колії.

Дослідження впливу швидкості рухомого навантаження на прогин при різних приведених масах колії проводиться при однаковій пружності підрейкової основи. Як показано у роботах [1, 7], приведена маса колії становить від 350 до 1900 кг/м. Графік залежності прогину від швидкості для різної приведеної маси колії показано на рис. 6. Із цього графіка видно, що існує максимальне значення прогину колії в залежності від швидкості. Прогин колії збільшується із збільшенням швидкості до цього значення, після чого він швидко зменшується. Резонансне значення прогину може бути пояснено співпадінням вимушених коливань, спричинених зовнішнім рухомих навантаженням та власної частоти коливань колії. Швидкість, при якій настає резонанс, залежить від приведеної маси колії. При збільшенні приведеної маси швидкість, при якій настає резонанс, зменшується, що й показано на рис. 6.

3. Перевірка моделі за експериментальними дослідженнями

Для перевірки моделі використовуються експериментальні дослідження ДПТУ [8], які були проведені при випробуванні колії на на-

прямку Миронівка – Київ. Характеристики колії: пружне скріплення КПП5, рейки UIC60, шпали залізобетонні, баласт щебеневий товщиною 50 см. Вертикальний модуль пружності підрейкової основи становить від 32,1 до 71,5 МПа. Для проведення випробувань використовувався рухомий склад із локомотивами ЧС8 при швидкості від 5 до 155 км/год.

Вертикальна геометрична нерівність на дослідній ділянці має малі значення, тому вона до уваги не береться. За вертикальні навантаження, які потрібні для проведення моделювання, беруться виміряні за допомогою системи тензодатчиків для різних швидкостей, що показано у табл. Максимальні прогини по моделі обчислюються за мінімальними ймовірними експериментальними значеннями модуля пружності та максимальними навантаженнями, знайденими в експерименті. Відповідно обчислюються мінімальні прогини. Максимальні, середні та мінімальні ймовірні результати розрахунку прогину по моделі та виміряні в експерименті показано на рис. 7.

Висновок

Дана робота є одним з етапів дослідження по удосконаленню існуючої методики правил розрахунку колії на міцність. Із виконаних розрахунків можна зробити такі висновки:

- аналіз впливу швидкості на прогин у разі різних мас дозволяє визначити швидкості руху та приведені маси, при яких виникають резонансні явища. Швидкість, при якій виникає резонанс, залежить від маси та жорсткості колії;
- додатковий прогин колії від рухомого навантаження може виникати за відсутності нерівностей колії завдяки лише динамічним характеристикам колії. Він збільшується при збільшенні швидкості від 0 до швидкості, при якій виникає резонанс, і швидко зменшується при подальшому збільшенні швидкості.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. М.Ф. Вериго, А.Я. Коган Взаимодействие пути и подвижного состава. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.
2. М.Ф. Вериго, Вертикальные силы действующие на путь при прохождении подвижного состава // Тр. ВНИИЖТ. – 1957. – Вып. 97.
3. Климов В.И., Рыбкин В.В., Недашковский В.Н., Моделирование сил трения в расчетах пути // Межвуз. сб. научн. тр. «Исследование взаимодействия пути и подвижного состава». – Д.: ДИИТ, 1985.

4. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика: Учебник для строительных специализированных вузов. – М.: Высш. школа, 1986. – 607 с.
5. Метьюз Джон Г., Финк, Куртис, Д. Численные методы. Использование MATLAB, 3-е издание: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 720 с.
6. Аладьев В.З., Богдявичус М.А. Maple 6: Решение математических, статистических и физико-технических задач – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 824 с.
7. Исследования взаимодействия пути и подвижного состава: Межвуз. сб. научн. тр. – Д.: ДИИТ, 1984. – 109 с.
8. Проведення динаміко-міцнісних випробувань колії на залізобетонних шпалах з пружинним скріпленням типу КПП, рейками UIC 60 та розробка рекомендацій по встановленню швидкостей руху по ній: Звіт про НДР, № 429. – Д.: ДІТ. – 2003. – 118 с.

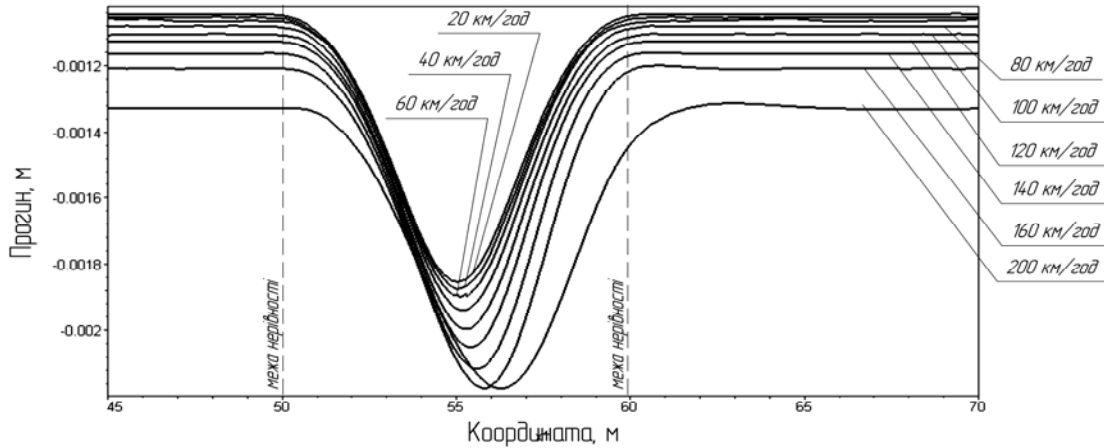


Рис. 5. Графік залежності прогину під точкою дії сили від координати при різних швидкостях руху від 20 до 200 км/год

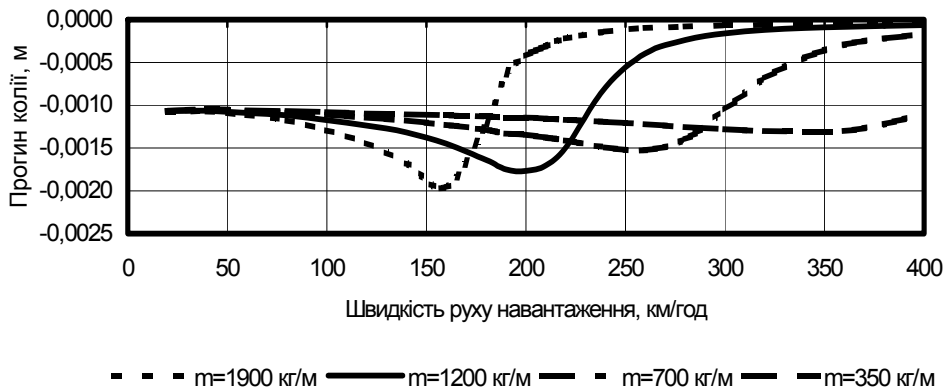


Рис. 6. Графік залежності прогину від швидкості для різної приведеної маси колії

Таблиця 1

Середні, мінімальні ймовірні та максимальні ймовірні значення вертикальних сил.

	Швидкості, км/год					
	60	100	120	130	140	155
P_{\min} , кН	52,67	51,37	31,25	49,73	49,37	32,52
\bar{P} , кН	109,33	108,58	105,13	109,78	105,25	101,64
P_{\max} , кН	165,99	165,79	179,01	169,83	161,13	170,76

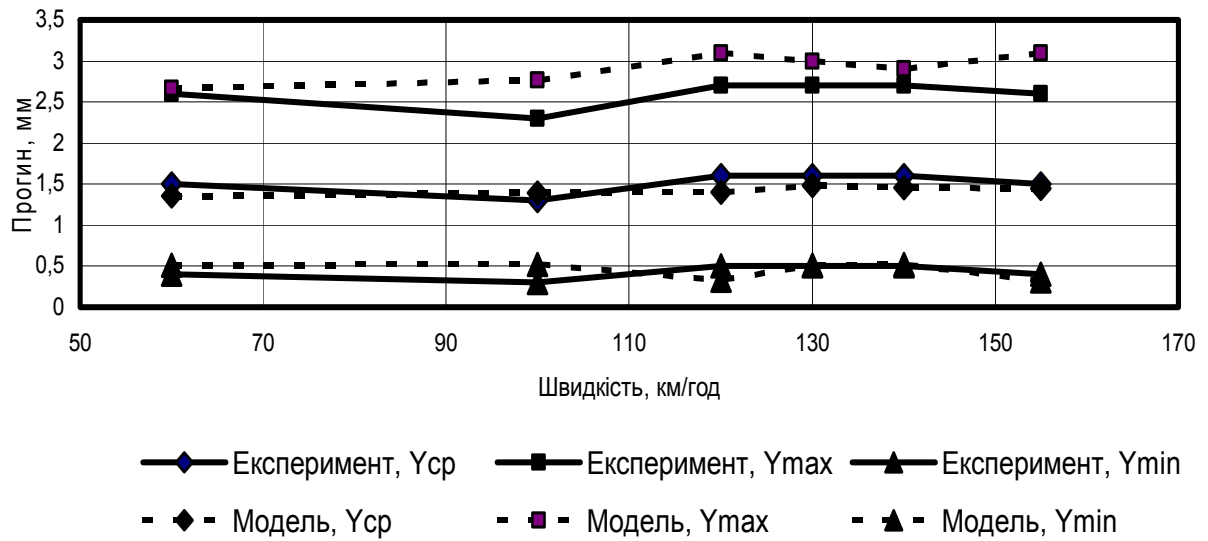


Рис. 7. Графіки залежності прогину від швидкості отримані по моделі та виміряні у експерименті.