

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 625.114:519.6

Я. С. ЛЕЙБУК¹, О. О. СКОРИК², Н. О. МУРИГІНА³, А. С. ЗВЕРЄВА^{4*}

¹ Кафедра «Колія та колійне господарство», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 59, ел. пошта leibuk@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-1810-0910

² Кафедра «Колія та колійне господарство», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 59, ел. пошта s.a.0317@ukr.net, ORCID 0000-0002-0943-7482

³ Кафедра «Колія та колійне господарство», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 59, ел. пошта murygina@kart.edu.ua

^{4*} Кафедра «Колія та колійне господарство», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 59, ел. пошта farwww@ukr.net, ORCID 0000-0002-4832-3760

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПРИВЕДЕНОЇ МАСИ КОЛІЇ

Метою роботи є визначення приведеної маси ґрунту, який бере участь в коливаннях по замірах динамічних напружень у земляному полотні. **Методика.** У дослідженні було використано динамічний стабілізатор колії ДСП-С4 на магістральній колії. Були задані дві частоти роботи, які дорівнюють динамічним коливанням від рухомого складу потяга. Під час дослідження були зроблені заміри прискорень колії за допомогою акселерометра, який був розміщений на підшві рейки. **Результати.** Згодом були побудовані графіки прискорень колій, в залежності від заданої частоти та відстані до динамічного навантаження. Для магістральних шляхів необхідно визначити вплив сил інерції в вертикальній площині. Для визначення цього значення необхідно знайти задану масу шляху, для цього проведено експеримент в польових умовах з використанням динамічного стабілізатору шляху. Були задані дві частотні характеристики 10 і 27 Гц, під час яких вимірювання прискорення швидкості проводилися з використанням акселерометра, який був розташований на шийці рейки. Згодом були побудовані графіки прискорення шляхів в залежності від заданої частоти і відстані до динамічного навантаження. Для визначення інерційних та дисипативних характеристик колії для континуальної та дискретної моделей були проведені експериментальні дослідження на вимушені коливання колії. При цьому система вводилась в резонанс, що підвищує достовірність отриманих значень приведеної маси та коефіцієнту дисипації. В більшості відомих на теперішній час досліджень використовується експериментальний метод, в якому приведену масу визначають шляхом за виміром вертикальних прискорень в деяких фіксованих поперечних перерізах рейки при переході через ці перерізи коліс рухомого складу, а саме в нерухомій системі координат. **Наукова новизна.** При визначенні інерційних та дисипативних характеристик колії в якості збудника вимушених коливань використано динамічний стабілізатор колії ДСП-С4, під час проходження якого моделювався рух пасажирського потягу. **Практична значимість** полягає в тому, що була розроблена методика визначення інерційних та дисипативних характеристик колії на вимушені коливання.

Ключові слова: залізнична колія; динамічний стабілізатор; приведена маса колії; чисельні дослідження

Вступ

Дослідженню характеристик коливального процесу залізничної колії присвячено ряд робіт. Але через велику відмінність в значеннях параметрів, отриманих за різними методиками, навіть для дискретної моделі колії, доцільно продовжити дослідження з метою уточнення вказаних параметрів. Для визначення інерційних та дисипативних характеристик колії для континуальної та дискретної його моделей були проведені експериментальні дослідження на вимушені коливання колії.

В точці контакту рейки та рухомого колеса, взаємодія, зосереджена в цій точці, приведена маса колії, дія якої на коливальну систему «ко-

лія-колесо» еквівалентна дії розподілених мас колії на більшій довжині. В більш точних розрахункових схемах приведена маса колії представлена розподіленою за протяжністю колії.

При приведенні маси колії до точки контакту рухомого колеса зазвичай використовують розрахункову схему з розподіленими параметрами або лінійчату схему взаємодії колії та рухомого складу. При використанні такого роду розрахункових схем виникають питання. А саме, як правильно визначити приведену масу колії та до якого колеса екіпажу приєднувати однакові приведені маси колії, таким чином чи можна вважати, що величина приведеної маси колії не залежить від силових процесів на сусі-

дніх з ним колесах. Але це визначення приведеної маси колії незадовільно тому, що дозволяє за значення приведеної маси прийняти будь-яке число і при цьому дія її виявиться еквівалентною дією на колесо розподілених мас колії, якщо підібрати відповідні прискорення.

Деякі дослідники (Веріго, & Коган, 1986; Даніленко, & Рибкін, 2006; Ершов, & Митин, 1989; Коншин, 1968) намагались визначити значення приведеної маси, зосередженої в точці контакту колеса та рейки зі значень розподіленої маси колії. Ці спроби були засновані на використанні методу Релея. Так К. М. Шмідт (1941) визначив приведену до контакту з колесом масу колії як суму приведених до цього контакту мас рейко-шпальної решітки, баластового шару та ґрунту земляного полотна. К. М. Шмідт виходив з того, що кінетична енергія зосередженої в точці контакту рейки з колесом приведеної маси колії на довжині деформованої рейки.

При визначенні приведеної маси ґрунту можна скористатися приблизною оцінкою, яка бере участь в коливаннях маси ґрунту по замірах динамічних напружень в земляному полотні. Г. Г. Коншин (1968) запропонував апроксимувати розподілення напружень в земляному полотні на відстані від підшви рейки.

Експериментальними даними Г. Г. Коншина (1968) та А. І. Гасанова (1968) визначено для $V=100$ км/год значення приведеної маси колії для колії з рейками типу Р50 на дерев'яних шпалах (1840 шт/км) та щебеневому баласті ($h=45$ см) та для такої ж колії, але з залізобетонними шпалами при товщині баластного шару 50 см. Воно виявилось в першому випадку 1271 кг, а в другому 1438 кг.

Очевидно, що найбільш точно визначення приведеної маси колії можливе лише експериментальними методами. Але експериментальне неперивне вимірювання вертикальних прискорень рухомої точки контакту колеса та рейки через нерівності та, особливо, мікронерівності на їх контакт практично неможливе. Тому в більшості відомих на теперішній час дослідженнях (Baluch, 1978; Hegian, & Aniołek, 2011; Даніленко, 2010; Першин, 1996) використовується експериментальний метод, в якому приведена маса визначається за вимірами вертикальних прискорень в деяких фіксованих поперечних перерізах рейки при переході через ці перерізи коліс рухомого складу, а саме в нерухомій системі координат.

© Я. С. Лейбук, О. О. Скорик, Н. О. Муригіна, А. С. Зверева, 2019

Мета

Метою роботи є вирішення науково-практичної задачі підвищення точності розрахунків взаємодії колії та рухомого складу.

Методика

Для магістральних колій, необхідно визначити вплив сил інерції у вертикальній площині. Для встановлення цієї величини необхідно знайти приведену масу колії, для чого проведено експеримент в польових умовах, за допомогою динамічного стабілізатора колії. Були задані дві частоти роботи 10 та 27 Гц. При яких були зроблені заміри прискорень колії за допомогою акселерометра, який був розміщений на шийці рейки. Згодом були побудовані графіки прискорень колій, в залежності від заданої частоти та відстані до динамічного навантаження.

Результати

Для визначення інерційних та дисипативних характеристик колії для континуальної та дискретної його моделей були проведені експериментальні дослідження на вимушені коливання колії. Були взяті до уваги попередні дослідження Г. П. Бурчака та М. В. Вольнова (1976), які використовували для збудження вимушених коливань вібраційну машину конструкції НДІ мостів ЛШЗТу.

В нашому експерименті в якості збудника вимушених коливань використовувався динамічний стабілізатор колії ДСП-С4. Під час дослідження на підшві рейки Р65 встановлювався акселерометр (рис. 1), для визначення прискорень колії.



Рис.1. Акселерометр на підшві рейки Р65

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Динамічний стабілізатор починав свій рух за 50 м до точки замірів з робочою швидкістю 5 км/год та встановленою частотою 10 Гц, що є рівнозначною для пасажирського потягу, який рухається зі швидкістю 80 км/год.

Під час експерименту виконувались два рази заміри при частоті 10 Гц та один раз при частоті 27 Гц. Потім при отриманні результатів були побудовані графіки залежностей прискорень колії від часу при різних частотах (рис. 2-4). Обробка отриманих в результаті проведення експериментальних досліджень полягала в тому, що визначались величини амплітуд прискорень рейок та їх частоти.

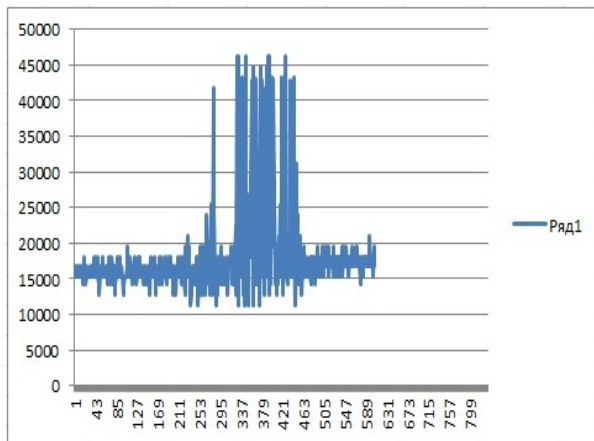


Рис. 2. Графік залежностей прискорень колії від часу при частоті 10 Гц (перше вимірювання)

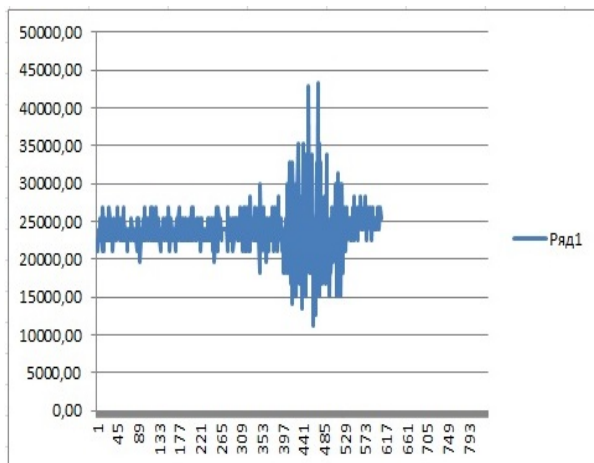


Рис. 3. Графік залежностей прискорень колії від часу при частоті 10 Гц (друге вимірювання)

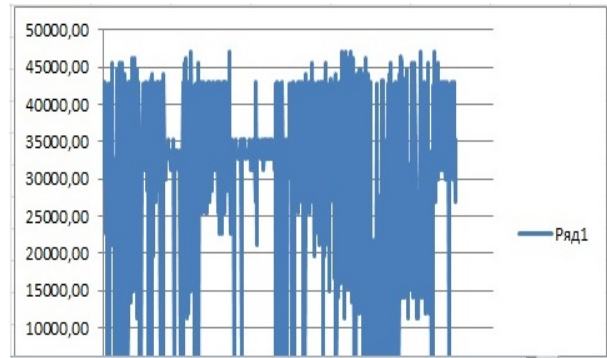


Рис. 4. Графік залежностей прискорень колії від часу при частоті 27 Гц

Як видно з рисунків 2-4, отримані за допомогою експерименту симетричної системи значень величини, можуть бути використані в якості початкового наближення до системи з кутовими коливаннями. В якості першого приближення враховано, що значення розподілених мас, коефіцієнтів дисипації та модулів пружності рівні для рейкових ниток і дорівнюють половині відповідних величин, які визначаються для симетричної системи. Значення ексцентриситету та радіусу інерції орієнтовно відомі з умов проведення експерименту. При цьому система вводилась в резонанс, що підвищує достовірність отриманих значень приведеної маси та коефіцієнту дисипації.

Використовуючи цей розрахунковий апарат та експериментальні дані Г. Г. Коншина (1968) та А. І. Гасанова (1968), визначено для $V=100$ км/год значення приведеної маси колії для колії з рейками типу Р65 на залізобетонних шпалах (1840 шт/км) та щебеневому баласті ($h=50$ см). Воно виявилось в першому випадку 1271 кг, а в другому 1438 кг.

Очевидно, що найбільш точно визначення приведеної маси колії можливе лише експериментальними методами. Але експериментальне неперервне вимірювання вертикальних прискорень рухомої точки контакту колеса та рейки через нерівності та особливо мікронерівності на їх контакт практично неможливо. Тому в більшості відомих на теперішній час дослідженнях використовується експериментальний метод (Даніленко, 2010), в якому приведена маса m_{II}^{0*} визначається за вимірами вертикальних прискорень w_{II}^{0*} в деяких фіксованих поперечних перерізах рейки при переході через ці перерізи коліс рухомого складу, а саме в нерухомій системі координат (2):

$$w_{\Pi}^{0*} = \left[\frac{d^2 z^0(x, t)}{dt^2} \right]_{x=x_0}. \quad (1)$$

Можемо побачити, що w_{Π}^{0*} та w_{Π}^0 відрізняються. Якщо уявити собі, що ідеально кругле колесо котиться по ідеально прямолинійній горизонтальній рейці з постійної по довжині колії та в часі і не рівній безкінечності жорсткості колії, то точка контакту колеса та рейки буде рухатись по горизонтальній прямій та w_{Π}^0 буде дорівнювати нулю. В тих же умовах прискорення w_{Π}^{0*} , виміряні в деяким фіксованим перерізі колії, при проході по ньому того ж колеса будуть суттєво відрізнятися від нуля. w_{Π}^{0*} та w_{Π}^0 будуть співпадати лише в тому випадку, коли v – швидкість поступового руху перемінного навантаження $Q(t)$ буде дорівнювати нулю, так як в цьому випадку в виразі (2).

Для випадку, коли змінне в часі навантаження просувається зі швидкістю $v \neq 0$, приведена маса колії може бути визначена з умови рівності інерційних сил, які передаються рейкою колесу, з рівняння:

$$m_{\Pi}^0 = m_{\Pi}^{0*} \frac{\left[\frac{d^2 z^0(x, t)}{dt^2} \right]_{x=x_0}}{\frac{d^2 z^0(x_0, t)}{dt^2}}, \quad (2)$$

де m_{Π}^{0*} – маса, яка визначається в нерухомій системі координат.

Оскільки $z^0(x, t)$ та $z^0(x_0, t)$ це функції часу, то залежать від динамічної сили $Q(t)$, яку сприймає рейка, то очевидно, що без знання цих функцій неможливо визначити співвідношення m_{Π}^{0*} та m_{Π}^0 . З цього є важливий висновок, що при експериментальному визначенні m_{Π}^{0*} за прискореннями в фіксованій точці колії m_{Π}^{0*} неможна вважати величиною, постійною в часі.

Наукова новизна та практична значимість

Оскільки частоти збурювальних сил під кожним колесом екіпажа різні, а коливання елементів верхньої будови колії залежать від збурювальних сил, викликаних не одним колесом,

а сукупністю розташованих коліс, то прийняття в лінійних розрахункових схемах припущення про наявність під кожним колесом своїх «незалежних» та рівних за значеннями приведених мас прийнятно, лише для отримання приблизних результатів розрахунків.

Висновки

В результаті досліджень знайдено методику визначення приведеної маси ґрунту, який бере участь в коливаннях по замірах динамічних напружень в земляному полотні експериментальним методом. У дослідженні було використано динамічний стабілізатор ДСП-С4 на магістральній колії. Були задані дві частоти роботи, які дорівнюють динамічним коливанням від рухомого складу потяга. Під час дослідження були зроблені заміри прискорень колії за допомогою акселерометра, який був розміщений на шийці рейки. Згодом були побудовані графіки прискорень колій, в залежності від заданої частоти та відстані до динамічного навантаження.

Розроблена методика визначення інерційних та дисипативних характеристик дискретної моделі колії на вимушені коливання. При цьому система вводилась в резонанс, що підвищує достовірність отриманих значень приведеної маси та коефіцієнту дисипації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Baluch, H. (1978). *Diagnostyka nawierzchni kolejowej*. Warszawa: Wydawnictwa komunikacji i łączności.
- Herian, J., & Aniolek, K. (2011). Modelling of structure and properties of pearlitic steel and abrasive wear of the turnout frog in the cyclic loading conditions. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 49(1), 71-81.
- Бурчак, Г. П., & Вольнов, М. В. (1976). Определение инерционных и диссипативных характеристик пути из опыта на вынужденном колебании. *Труды МИИТ*, 542, 43-68.
- Вериго, М. Ф., & Коган, А. Я. (1986). *Взаимодействие пути и подвижного состава*. Москва: Транспорт.
- Гасанов, А. И. (1968). О приведенной массе пути. *Вестник ВНИИЖТ*, 6, 52-53.
- Даніленко, Е. І., & Рибкін, В. В. (2006). *Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість*. Київ: Транспорт України.
- Даніленко, Е. І. (2010). *Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомих складом* (Т. 2). Київ: Інпрес.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Ершов, О. П., & Митин, Н. Ф. (1989). *Динамическая оценка отступлений в содержании железнодорожного пути и дальнейшее ее совершенствование*. Москва: Транспорт.
- Коншин Г. Г. (1968). Работа пути с железобетонными шпалами под нагрузкой. *Труды МИИТ*, 178, 20-59.
- Першин, С. П. (1996). Вертикальные жесткости пути и его надежность. *Путь и путевое хозяйство*, 6, 8-10.
- Шмидт, К. М. (1941). Влияние массы пути на деформацию его при ударе колеса с подрессоренным грузом. *Сб. НИИ пути*, 1941, 87-109.

Я. С. ЛЕЙБУК¹, А. А. СКОРИК², Н. А. МУРЫГИНА³, А. С. ЗВЕРЕВА^{4*}

¹ Кафедра «Путь и путевое хозяйство» Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 59, эл. почта leibuk@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-1810-0910

² Кафедра «Путь и путевое хозяйство» Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 59, эл. почта s.a.0317@ukr.net, ORCID 0000-0002-0943-7482

³ Кафедра «Путь и путевое хозяйство» Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 59, эл. почта murygina@kart.edu.ua

^{4*} Кафедра «Путь и путевое хозяйство» Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 59, эл. почта farwww@ukr.net, ORCID 0000-0002-4832-3760

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННОЙ МАССЫ ПУТИ

Цель работы состоит в определении приведенной массы грунта, который участвует в колебаниях по замерам динамических напряжений в земляном полотне. **Методика.** В исследовании был использован динамический стабилизатор пути ДСП-С4 на магистральном пути. Заданы две частоты работы, которые равны динамическим колебаниям от подвижного состава поезда. В ходе исследования были сделаны замеры ускорений пути с помощью акселерометра, который был размещен на подошве рельса. **Результаты.** Впоследствии были построены графики ускорений пути, в зависимости от заданной частоты и расстояния до динамической нагрузки. Для магистральных путей необходимо определить влияние сил инерции в вертикальной плоскости. Для установления этого значения необходимо найти заданную массу пути, для этого был проведен эксперимент в полевых условиях с использованием динамический стабилизатор пути. Были заданы две частотные характеристики 10 и 27 Гц. Измерения ускорения скорости проводились с использованием акселерометра, который был размещен на шейке рельса. Впоследствии были построены графики ускорения путей в зависимости от заданной частоты и расстояния до динамической нагрузки. Для определения инерционных и диссипативных характеристик пути для континуальной и дискретной моделей были проведены экспериментальные исследования на вынужденные колебания пути. При этом система вводилась в резонанс, что повышает достоверность полученных результатов значений приведенной массы и коэффициента диссипации. В большинстве известных в настоящее время исследований используется экспериментальный метод, в котором заданную массу определяют путем измерения вертикальных ускорений в некоторых фиксированных поперечных сечениях рельса при прохождении через эти сечения колес подвижного состава, а именно в фиксированной системе координат. **Научная новизна.** При определении инерционных и диссипативных характеристик пути в качестве возбудителя вынужденных колебаний использовано динамический стабилизатор пути ДСП-С4, при прохождении которого моделировался движение пассажирского поезда. **Практическая значимость** заключается в том, что была разработана методика определения инерционных и диссипативных характеристик пути на вынужденные колебания.

Ключевые слова: железнодорожный путь; динамический стабилизатор; приведенная масса пути; численные исследования

Y. S. LEIBUK¹, A. A. SCORYK², N. A. MURYGINA³, A. S. ZVIERIEVA^{4*}

¹ Department «Track and track facilities» of Ukrainian State University of Railway, Feuerbach sq. 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 59, e-mail leibuk@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-1810-0910

² Department «Track and track facilities» of Ukrainian State University of Railway, Feuerbach sq. 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 59, e-mail s.a.0317@ukr.net, ORCID 0000-0002-0943-7482

© Я. С. Лейбук, О. О. Скорик, Н. О. Муригина, А. С. Зверева, 2019

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE ARRAYED MASS OF THE TRACK

The purpose of the work is to determine the reduced mass of soil, which participates in fluctuations in measurements of dynamic stresses in the earth's canvas. **Methodology.** In the study, the dynamic stabilizer of the DSP-S4 track on the main track was used. Two work frequencies were given, which are equal to the dynamic fluctuations of the rolling stock of the train. During the study, measurements of acceleration of the track were made using an accelerometer, which was placed on the sole of the rails. **Findings.** Subsequently, graphs of acceleration of the tracks were constructed, depending on the given frequency and the distance to the dynamic load. For trunk tracks, it is necessary to determine the effect of the forces of inertia in the vertical plane. To establish this value, we need to find the given mass of the track, which is why we conducted an experiment in the field, using a dynamic track stabilizer. Two frequency frequencies of 10 and 27 Hz were given, during which measurements of speed accelerations were made using an accelerometer which was placed on the neck of the rail. Subsequently, graphs of acceleration of the tracks were constructed, depending on the given frequency and the distance to the dynamic load. The method of determining the inertial and dissipative characteristics of the discrete model of the path for forced oscillations was also determined. At the same time, the system was introduced into a resonance, which increases the reliability of the obtained values of the reduced mass and the dissipation coefficient. In the majority of the currently known studies an experimental method is used in which the given mass is determined by measurements of vertical accelerations in some fixed cross-sectional sections of the rail during the transition through these sections of the wheels of the rolling stock, namely, in a fixed coordinate system. **Originality.** In determining the inertial and dissipative characteristics of the track, the dynamic stabilizer of the DSP-S4 path was used as the causative agent of forced oscillations, during the passage of which the motion of the passenger train was simulated. **Practical value** lies in the fact that a technique was developed for determining the inertial and dissipative characteristics of the path to forced oscillations.

Keywords: railroad track; dynamic stabilizer; driven track mass; numerical studies

REFERENCES

- Baluch, H. (1978). *Diagnostyka nawierzchni kolejowej*. Warszawa: Wydawnictwa komunikacji i łączności.
- Herian, J., & Aniolek, K. (2011). Modelling of structure and properties of pearlitic steel and abrasive wear of the turnout frog in the cyclic loading conditions. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 49(1), 71-81. (in English)
- Burchak, G. P., & Vol'nov, M. V. (1976). Opredelenie inercionnyh i dissipativnyh harakteristik puti iz opyta na vyzhdennom kolebanii. *Trudy MIIT*, 542, 43-68. (in Russian)
- Verigo, M. F., & Kogan, A. Ja. (1986). *Vzaimodejstvie puti i podvizhnogo sostava*. Moskva: Transport. (in Russian)
- Gasanov, A. I. (1968). O privedennoj masse puti. *Vestnik VNIIZhT*, 6, 52-53. (in Russian)
- Danilenko, E. I., & Rybkin, V. V. (2006). *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist*. Kyiv: Transport Ukrainy. (in Ukrainian)
- Danilenko, E. I. (2010). *Zaliznychna kolii. Ulashtuvannia, proektuvannia i rozrakhunky, vzaiemodiia z rukhomym skladom (T. 2)*. Kyiv: Inpres. (in Ukrainian)
- Ershov, O. P., & Mitin, N. F. (1989). *Dinamicheskaja ocenka otstupenij v sodержanii zheleznodorozhnogo puti i dal'nejshee ee sovershenstvovanie*. Moskva: Transport. (in Russian)
- Konshin G. G. (1968). Rabota puti s zhelezobonnymi shpalami pod nagruzkoj. *Trudy MIIT*, 178, 20-59. (in Russian)
- Pershin, S. P. (1996). Vertikal'nye zhestkosti puti i ego nadezhnost'. *Put' i putevoe hozjajstvo*, 6, 8-10. (in Russian)
- Shmidt, K. M. (1941). Vlijanie massy puti na deformaciju ego pri udare koleasa s podressorennyim gruzom. *Sb. NII puti, 1941*, 87-109. (in Russian)

Надійшла до редколегії 31.05.2019

Прийнята до друку 07.06.2019