

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Лейбук Ярослав Сергійович



УДК 625.143.482

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІНЕРЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОЛІЇ НА ПРОЦЕСИ ВЗАЄМОДІЇ З РУХОМИМ СКЛАДОМ**

05.22.06 – залізнична колія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис. Робота виконана на кафедрі «Залізнична колія і транспортні споруди» Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Потапов Дмитро Олександрович,
Український державний університет
залізничного транспорту,
доцент кафедри залізничної колії
і транспортних споруд

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Даніленко Едуард Іванович,
Державний університет
інфраструктури та технологій,
завідувач кафедри колії та
колійного господарства

кандидат технічних наук, доцент
Патласов Олександр Михайлович,
Дніпровський національний університет
залізничного транспорту ім. академіка В.
Лазаряна, директор навчально-наукового
центру розвитку професійної освіти, доцент
кафедри транспортної інфраструктури

Захист дисертації відбудеться «28» квітня 2021 р. о 15:00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.820.02 Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7 і на сайті <http://kart.edu.ua>

Автореферат розісланий «26» березня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02, к.т.н., доц.



О.В. Лобяк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Взаємодію залізничної колії та рухомого складу можна розглядати як сукупність фізичних процесів, які виникають під час руху поїздів (вагонів, локомотивів) по рейкових коліях залізниць. Саме ці процеси багато в чому обумовлюють прийняття відповідних організаційно-технічних рішень на етапах проектування, будівництва, експлуатації та реконструкції залізничних ліній і безпосередньо впливають на один з основних показників роботи залізничного транспорту – безпеку руху.

Динамічний характер впливу рухомого складу на колію, особливості її профілю і плану, температурні впливи навколишнього природного середовища, неоднорідність фізико-механічних характеристик матеріалів, коливальні процеси, що виникають під час руху екіпажів, – все це свідчить про складність процесів взаємодії залізничної колії і рухомого складу. Тому при вивченні цього питання завжди виникає необхідність у вирішенні багатofакторних задач з великою кількістю невідомих. Крім того, необхідно враховувати, що фактори впливу на процеси взаємодії є змінними у часі і просторі.

До одного з таких факторів можна віднести саме інерційні характеристики залізничної колії, зокрема величину її маси, яка бере участь у взаємодії з рухомим складом в точці контакту з колесом (приведена маса залізничної колії). Багаторічні дослідження провідних вчених дозволили розробити теоретичні та експериментальні підходи щодо визначення ролі цієї характеристики на процеси формування напруженого стану залізничної колії. Але отримані результати, в своїй переважній більшості, не в повній мірі відповідають сучасним умовам експлуатації на магістральних залізницях України, особливо приймаючи до уваги перспективи підвищення швидкостей руху.

Впровадження в експлуатацію нових типів рухомого складу, матеріалів та конструкцій залізничної колії і, насамперед, забезпечення при цьому необхідного рівня безпеки руху – все це створює об'єктивні передумови щодо продовження досліджень для розширення уявлень щодо впливу приведеної маси залізничної колії на силові показники взаємодії з рухомим складом. Тому дослідження впливу інерційних характеристик колії на процеси взаємодії з рухомим складом є актуальним науково-технічним завданням на даному етапі розвитку вітчизняної залізничної галузі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до головних напрямків розвитку залізничного транспорту, які сформульовані в Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року (схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 № 430-р.). Обраний напрямок досліджень пов'язаний з держбюджетною тематикою кафедри «Залізнична колія і транспортні споруди» Українського державного університету залізничного транспорту, зокрема з науково-дослідною роботою «Теоретичні та експериментальні дослідження впливу електрокорозійного і напружено-

деформованого стану залізничних споруд і колій на їх надійність і безпеку руху» (номер державної реєстрації №ДР 0113U001031), а також з іншими, в яких здобувач був виконавцем і автором окремих розділів у звітах: «Теоретичні дослідження можливості експлуатації пружного проміжного рейкового скріплення типу КПП-5 українського виробництва при швидкостях руху більше 160 км/год» (№ ДР 01207U103523), ««Аналітичний огляд організаційно-технічних заходів при впровадженні перспективних елементів верхньої будови колії»» (№ ДР 0121U109192).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є встановлення впливу приведеної маси колії на величину сил взаємодії залізничної колії і рухомого складу у вертикальній площині в експлуатаційних умовах магістральних залізниць, що передбачає розв'язання наступних задач:

- проаналізувати існуючі моделі для визначення сил взаємодії залізничної колії та рухомого складу для різних умов експлуатації;
- внести зміни в просторову математичну модель динамічної системи «екіпаж-колія» з урахуванням особливостей конструкції пасажирського рухомого складу магістральних залізниць та вимушених коливань залізничної колії у вертикальній площині під дією зовнішніх навантажень;
- провести теоретичну оцінку та експериментальну верифікацію величини приведеної маси залізничної колії в умовах магістральних залізниць;
- дослідити чисельними методами сили взаємодії рухомого складу і колії у вертикальній площині для умов магістральних залізниць.

Об'єкт досліджень – процеси взаємодії залізничної колії та рухомого складу в умовах магістральних залізниць.

Предмет досліджень – вплив приведеної маси залізничної колії на сили взаємодії рухомого складу і колії у вертикальній площині в умовах магістральних залізниць.

Методи досліджень. В роботі використано комплексний метод досліджень. При проведенні аналітичних розрахунків було застосовано загальноприйняті методи розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість, теоретичної та будівельної механіки, а також основні положення теорії пружності. Експериментальні методи містять вимірювання прискорень цифровими акселерометрами на базі мікроконтролерів. Обробка даних та розрахунки виконувались із застосуванням програм Microsoft Excel, Mathcad та Matlab.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.

Всі наукові положення, висновки і рекомендації, які сформульовані в дисертації, є в достатній мірі обґрунтованими і достовірними, що обумовлено коректністю постановки й розв'язання поставлених задач. Достовірність наукових результатів обумовлена використанням надійних незалежних методів теоретичних та експериментальних досліджень, в тому числі

основних положень теорії пружності, будівельної та теоретичної механіки, методів розрахунку залізничної колії на міцність та стійкість, що підтверджується узгодженістю між собою теоретичних та експериментальних даних досліджень, а також з результатами інших дослідників за цими питаннями.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. *Вперше* величина приведеної маси залізничної колії визначена з урахуванням геометрії поширення напружень (відповідних динамічних деформацій) у півпросторі залізничної колії, який залучений до взаємодії з рухомим складом.

2. *Удосконалено* математичну модель по визначенню сил взаємодії рухомого складу і залізничної колії на дискретній підрейковій основі з нелінійними пружно-дисипативними характеристиками за рахунок введення в модель інерційних характеристик колії.

3. *Доповнено* теоретичні підходи по визначенню приведених мас баластного шару, земляного полотна і залізничної колії в цілому, що дозволило врахувати вплив окремих конструктивних параметрів залізничної колії та швидкостей руху на її приведену масу.

Практична значимість отриманих результатів полягає в наступному:

- отримані в роботі результати створюють передумови для оцінки можливості підвищення швидкостей на діючих дільницях прискореного руху АТ «Укрзалізниця», а також дозволяють більш точно визначати напружений стан залізничної колії, зокрема при введенні в експлуатацію на магістральних залізницях України нових типів рухомого складу та конструкцій колії

- результати дослідження використовуються в навчальному процесі Українського державного університету залізничного транспорту при підготовці фахівців освітнього рівня «магістр» спеціальності 273 «Залізничний транспорт» за освітньою програмою «Залізничні споруди та колійне господарство».

Практичне впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджується відповідними актами, які надано в додатках до дисертації.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні та експериментальні результати отримані автором самостійно (критичний аналіз літературних та інших джерел за тематикою дослідження, експериментальні роботи по визначенню приведеної маси залізничної колії, адаптація просторової моделі динамічної системи «екіпаж-колія» з урахуванням конструктивних особливостей пасажирського рухомого складу магістральних залізниць та інерційних характеристик залізничної колії, дослідження числовими методами рівня вертикальних сил взаємодії залізничної колії та рухомого складу), а також у співавторстві. Особистий внесок автора у спільні публікації відображений у переліку опублікованих робіт.

Публікації. Основні наукові результати дисертаційної роботи опубліковано у 12 наукових працях, з яких: 3 статті у виданнях інших держав, які входять до Організації економічного співробітництва та

Європейського союзу, з яких 2 – індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus; 4 статті у виданнях, що входять до переліку фахових видань України та 5 праць апробаційного характеру.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційних досліджень доповідались і отримали схвалення на 5 міжнародних науково-технічних конференціях: VI Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 19-21 квітня 2017 р.), VII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», що присвячена 110-річчю зі дня народження Заслуженого діяча науки і техніки України д.т.н., професора Ангелейка В.І. (м. Харків, 14-16 листопада 2018 р.), на 80-й Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 24-26 квітня 2018 р.), 78-й Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті». (м. Харків, 26-28 жовтня 2016 р.), 79-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпро, 16-17 травня 2019 р.).

Дисертаційна робота в повному обсязі доповідалась та обговорювалась на засіданні кафедри «Залізнична колія і транспортні споруди» (м. Харків, 23 листопада 2020 р.) та міжвузівському семінарі Українського державного університету залізничного транспорту щодо апробації результатів дисертаційних досліджень (18 лютого 2021 р.)

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, основних висновків, списку використаних джерел із 138 найменувань на 14 сторінках, містить 153 сторінок основного тексту, 45 рисунків, 15 таблиць, 3 додатка.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, наведено мету і завдання досліджень, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, дані про апробацію та опублікування результатів досліджень, структуру та обсяг роботи.

В першому розділі наведені результати аналізу розвитку теорії взаємодії залізничної колії з рухомим складом. Перші дослідження в цій сфері були проведені відомими вченими, зокрема П.П. Мельниковим, який в 1835 р. вперше здійснив розрахунок рейки як балки на жорстких опорах, під дією вертикального навантаження. В 1867–1888 рр. Є. Вінклер і Г. Циммерман розробили теорію розрахунку рейки, як нерозрізної балки, що лежить на чотирьох пружних опорах. В 1888 р. професор А.А. Холодецький розробив один з перших способів розрахунку рейки на загальну дію вертикальних і горизонтальних сил. В 1903–1906 рр. академік Н.П. Петров вперше прийняв у розрахунках загальну схему рейки як балки нескінченної довжини, що лежить на суцільній пружній основі.

Викладені вище ідеї набули свого подальшого розвитку, що дозволило суттєво розвинути теоретичну базу, експериментальні підходи та розробити основи математичного моделювання для досліджень питань взаємодії залізничної колії та рухомого складу в різних умовах експлуатації. Значний внесок в цей розвиток привнесли роботи М.М. Беляєва, Е.М. Бромберга, М.Ф. Веріго, А.Х. Ветченка, О.П. Єршкова, В.Н. Данилова, С.Н. Попова, Г.М. Шахунянца, С.В. Амеліна, В.І. Ангелейка, М.Л. Корольова, М.О. Чернишова, С.П. Першина, В.В. Львовського, М.А. Фрішмана, В.А. Лазаряна, С.П. Тимошенка, М.П. Смирнова, Д.Г. Голованова, О.Я. Когана, В.Ф. Яковлєва, М.С. Нікєрова, К.Д. Бєлих, В.Ф. Ушкалова, В.Д. Петренка, С.М. Попова, Ю.Д. Волошка, А.М. Годицького-Цвірка, В.Д. Дановича, В.В. Рибкіна, С.В. Мямліна, О.Л. Тютькіна, О.М. Дарєнського, В.Г. Вєрбицького, Д.М. Кургана, а також вчених Німєччини, Франції, США, Японії, Польщі: Г. Герца, Ф. Бірмана, Е. Фраймана, Сен-Вєнана, Р. Марьє, Тальботома, Мітчєла, К. Мацубару, А. Тіля, Н. Балуха, М. Балуха та багатьох інших.

Особливо слід відмітити фундаментальні праці профєсора Е.І. Даніленка, під керівництвом якого було розроблено перші вітчизняні «Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість», а також підручники для вищих навчальних закладів залізничного транспорту України: «Залізнична колія» (2010 р.) та «Проектування і розрахунки конструкцій залізничної колії» (2019 р.).

Проведений аналіз показав, що на тепєрішній час існує широкий спектр засобів для математичного моделювання процесів взаємодії залізничної колії та рухомого складу. Так, виходячи із задач, що розв'язуються, можливе використання комбінацій моделей, які побудовані на плоских розрахункових схемах статичної рівноваги між деформацією об'єкта та сили, що прикладена до нього, або просторових систем на базі розрахункових схем динамічної рівноваги на основі принципу Лагранжа-д'Аламбера. Також одним з висновків проведеного аналізу можна вважати факт поступового відходу від використання в математичних моделях розрахункової схеми залізничної колії у вигляді балки на суцільній пружній основі. Оскільки, на думку достатньо великої кількості дослідників, це дещо ідеалізує залізничну колію та її технічний стан. В якості альтернативи можливе використання просторових моделей, в яких залізнична колія розглядається як балка, що спирається на окремі опори з нєлінійними пружно-дисипативними характеристиками.

Тому в рамках даного дослідження було прийнято рішення використовувати комплекс математичних моделей просторової динамічної системи «екіпаж-колія», основи якої були розроблені для умов залізниць незагального користування проф. О.М. Дарєнським, з урахуванням дискретності підрейкової основи, а також нєлінійності її пружно-дисипативних характеристик. Але цей комплекс (особливо підсистема «екіпаж») потребує суттєвих корєгувань, виходячи з особливостей конструкції пасажирського рухомого складу магістральних залізниць, а

також вимушених коливань залізничної колії у вертикальній площині під дією зовнішніх навантажень.

В другому розділі проведено адаптацію математичної моделі просторової динамічної системи «екіпаж-колія» проф. О.М. Даренського відповідно до завдань даного дослідження.

Виходячи з перспектив підвищення швидкостей по окремих напрямках магістральних залізниць України, в якості розрахункових одиниць рухомого складу в роботі обрано пасажирські електропоїзди EJ 675 («Skoda»), HRCS2 («Hyundai Rotem»), ЕКр1 (ПАО «КВСЗ»), які експлуатуються на ділянках прискореного руху АТ «Укрзалізниця».

З точки зору формування в підсистемі «екіпаж» диференційних рівнянь динамічної рівноваги між прискореним рухом тіл з масою та обмеженнями, що накладаються на можливість їх сумісного переміщення, до однієї з ключових особливостей цих типів рухомого складу можна віднести наявність двохступеневого ресорного підвішування (рис. 1). В загальному випадку на електропоїздах ЕКр1, HRCS2, EJ675 для гасіння вертикальних і бічних сил перший ступінь ресорного підвішування складається з гвинтових пружин і гумових блоків, у другому – між рамою візка та кузовом використовуються пневматичні ресори.



Рис. 1 – Конструкція візків електропоїздів EJ 675 («Skoda»), HRCS2 («Hyundai Rotem») та ЕКр1 (ПАО «КВСЗ»).

В переважній більшості попередніх досліджень (роботи канд. технічних наук В.Г. Вітольберга, Н.В. Бугаєць, А.В. Клименка, Е.А. Белікова, Ю.Л. Тулея), в якості розрахункових екіпажей приймалися спеціальні, спеціалізовані, вантажні рухомі одиниці з одним ступенем ресорного підвішування. Тому у розрахункову схему та систему диференційних рівнянь проф. О.М. Даренського були внесені відповідні зміни та доповнення.

Як базову, було прийнято схему чотиривісного екіпажа (рис. 2) з урахуванням кінетичних та силових зв'язків між його елементами, зокрема реакцій комплектів першого та другого ступенів ресорного підвішування. Кузов і частини візка вважаються твердими тілами. Вертикальні силові й кінематичні зв'язки підсистем «екіпаж» і «колія» подані з урахуванням одностороннього зв'язку колеса і рейки, пружної й дисипативних реакцій колії. При русі екіпажу з постійною швидкістю кількість лінійних і кутових

переміщень його елементів дорівнює сімнадцяти, які позначені на рис. 2 через незалежні координати підсистеми q_i .

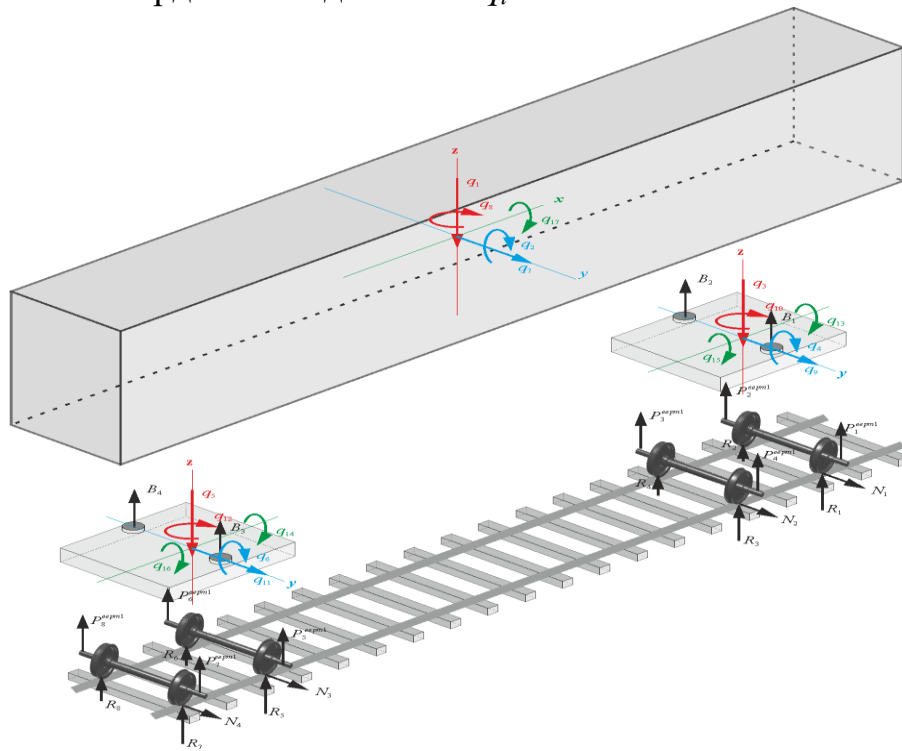


Рис. 2 – Розрахункова схема чотиривісного екіпажу.

Враховано можливість руху по колії коліс, що мають дисбаланс, нерівномірність прокату та повзуни і створюють ударні сили у стиках. Рейки розглядаються як балки, що спираються на окремі опори, які мають просторові пружно-дисипативні властивості.

Для врахування приведеної маси залізничної колії було розглянуто її вимушені коливання по довжині x у відповідний момент часу t під дією зовнішнього вертикального навантаження $q(x, t)$, що змінюється по гармонійному закону:

$$q(x, t) = q(x) \sin(\theta t) , \quad (1)$$

де θ – частота вимушених коливань; $q(x)$ – амплітудна функція зовнішнього навантаження, що залежить тільки від x .

Рішення диференційного рівняння вертикальних переміщень рейки, як балки, що спирається на окремі опори, отримано в даній роботі в наступному вигляді:

$$z(x) = z_0 A + \frac{z'_0}{S} B - \frac{M_0}{S^2 EI} C - \frac{Q_0}{S^3 EI} D + \frac{q}{S^4 EI} (1 - A) , \quad (2)$$

де z_0, z'_0, M_0, Q_0 – відповідно величина прогину, кута повороту, згинальний момент та поперечна сила на початку координат;

A, B, C, D – функції О.М.Крилова;

E – модуль пружності матеріалу рейки;

I – момент інерції поперечного перерізу рейки;

S – характеристичне число, яке визначається співвідношенням:

$$S^4 = \frac{m \cdot \theta^2}{EI}, \quad (3)$$

де m – маса колії, яка приймає участь у процесі коливань.

Функції О.М. Крилова в рівнянні (2) представляють собою:

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{1}{2} \cdot (ch(Sx) + \cos(Sx)) \\ B &= \frac{1}{2} \cdot (sh(Sx) + \sin(Sx)) \\ C &= \frac{1}{2} \cdot (ch(Sx) - \cos(Sx)) \\ D &= \frac{1}{2} \cdot (sh(Sx) - \sin(Sx)) \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Оскільки поширення хвилі вигину рейки можна не враховувати далі 2,5 м від точки прикладання зовнішнього навантаження, кількість опор у розрахунковій схемі (рис. 3) дорівнює десяти.

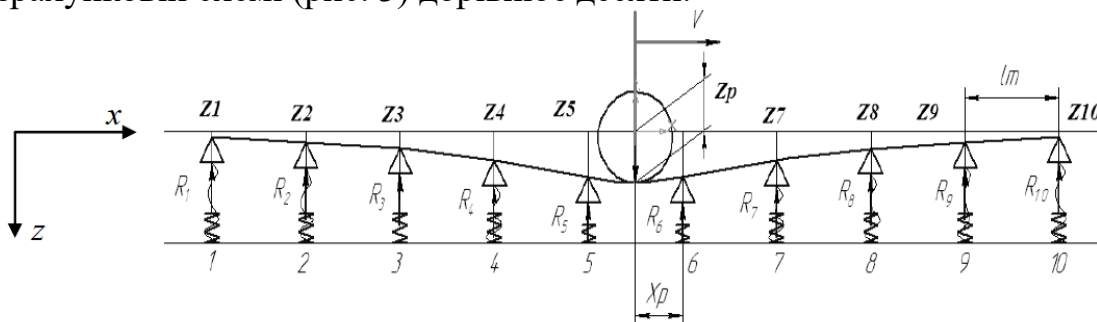


Рис. 3 – Розрахункова схема рейкової нитки на пружних опорах під дією рухомого навантаження.

Величину прогину на кожній рейковій опорі z_i у в момент часу t визначено по методу Крамера із наступного рівняння:

$$Z \cdot A = H, \quad (5)$$

де Z – матриця-стовпець невідомих деформацій (прогинів);

A – матриця пружних і інерційних характеристик колії;

H – матриця-стовпець зовнішнього навантаження.

Ці матриці мають наступний вигляд:

$$Z = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \\ z_6 \\ z_7 \\ z_8 \\ z_9 \\ z_{10} \end{pmatrix} \cdot z_i \quad H = \begin{bmatrix} D(l_{uu} - x_p) \\ D(2l_{uu} - x_p) \\ D(3l_{uu} - x_p) \\ D(4l_{uu} - x_p) \\ D(5l_{uu} - x_p) \\ D(6l_{uu} - x_p) \\ D(7l_{uu} - x_p) \\ D(8l_{uu} - x_p) \\ D(9l_{uu} - x_p) \\ D(10l_{uu} - x_p) \end{bmatrix} \cdot q(t)$$

$$A = \begin{pmatrix} S^3EI & CD(l_{uu}-2l_{uu}) & CD(l_{uu}-3l_{uu}) & CD(l_{uu}-4l_{uu}) & CD(l_{uu}-5l_{uu}) & CD(l_{uu}-6l_{uu}) & CD(l_{uu}-7l_{uu}) & CD(l_{uu}-8l_{uu}) & CD(l_{uu}-9l_{uu}) & CD(l_{uu}-10l_{uu}) \\ CD(2l_{uu}-l_{uu}) & S^3EI & CD(2l_{uu}-3l_{uu}) & CD(2l_{uu}-4l_{uu}) & CD(2l_{uu}-5l_{uu}) & CD(2l_{uu}-6l_{uu}) & CD(2l_{uu}-7l_{uu}) & CD(2l_{uu}-8l_{uu}) & CD(2l_{uu}-9l_{uu}) & CD(2l_{uu}-10l_{uu}) \\ CD(3l_{uu}-l_{uu}) & CD(3l_{uu}-2l_{uu}) & S^3EI & CD(3l_{uu}-4l_{uu}) & CD(3l_{uu}-5l_{uu}) & CD(3l_{uu}-6l_{uu}) & CD(3l_{uu}-7l_{uu}) & CD(3l_{uu}-8l_{uu}) & CD(3l_{uu}-9l_{uu}) & CD(3l_{uu}-10l_{uu}) \\ CD(4l_{uu}-l_{uu}) & CD(4l_{uu}-2l_{uu}) & CD(4l_{uu}-3l_{uu}) & S^3EI & CD(4l_{uu}-5l_{uu}) & CD(4l_{uu}-6l_{uu}) & CD(4l_{uu}-7l_{uu}) & CD(4l_{uu}-8l_{uu}) & CD(4l_{uu}-9l_{uu}) & CD(4l_{uu}-10l_{uu}) \\ CD(5l_{uu}-l_{uu}) & CD(5l_{uu}-2l_{uu}) & CD(5l_{uu}-3l_{uu}) & CD(5l_{uu}-4l_{uu}) & S^3EI & CD(5l_{uu}-6l_{uu}) & CD(5l_{uu}-7l_{uu}) & CD(5l_{uu}-8l_{uu}) & CD(5l_{uu}-9l_{uu}) & CD(5l_{uu}-10l_{uu}) \\ CD(6l_{uu}-l_{uu}) & CD(6l_{uu}-2l_{uu}) & CD(6l_{uu}-3l_{uu}) & CD(6l_{uu}-4l_{uu}) & CD(6l_{uu}-5l_{uu}) & S^3EI & CD(6l_{uu}-7l_{uu}) & CD(6l_{uu}-8l_{uu}) & CD(6l_{uu}-9l_{uu}) & CD(6l_{uu}-10l_{uu}) \\ CD(7l_{uu}-l_{uu}) & CD(7l_{uu}-2l_{uu}) & CD(7l_{uu}-3l_{uu}) & CD(7l_{uu}-4l_{uu}) & CD(7l_{uu}-5l_{uu}) & CD(7l_{uu}-6l_{uu}) & S^3EI & CD(7l_{uu}-8l_{uu}) & CD(7l_{uu}-9l_{uu}) & CD(7l_{uu}-10l_{uu}) \\ CD(8l_{uu}-l_{uu}) & CD(8l_{uu}-2l_{uu}) & CD(8l_{uu}-3l_{uu}) & CD(8l_{uu}-4l_{uu}) & CD(8l_{uu}-5l_{uu}) & CD(8l_{uu}-6l_{uu}) & CD(8l_{uu}-7l_{uu}) & S^3EI & CD(8l_{uu}-9l_{uu}) & CD(8l_{uu}-10l_{uu}) \\ CD(9l_{uu}-l_{uu}) & CD(9l_{uu}-2l_{uu}) & CD(9l_{uu}-3l_{uu}) & CD(9l_{uu}-4l_{uu}) & CD(9l_{uu}-5l_{uu}) & CD(9l_{uu}-6l_{uu}) & CD(9l_{uu}-7l_{uu}) & CD(9l_{uu}-8l_{uu}) & S^3EI & CD(9l_{uu}-10l_{uu}) \\ CD(10l_{uu}-l_{uu}) & CD(10l_{uu}-2l_{uu}) & CD(10l_{uu}-3l_{uu}) & CD(10l_{uu}-4l_{uu}) & CD(10l_{uu}-5l_{uu}) & CD(10l_{uu}-6l_{uu}) & CD(10l_{uu}-7l_{uu}) & CD(10l_{uu}-8l_{uu}) & CD(10l_{uu}-9l_{uu}) & S^3EI \end{pmatrix}$$

де C – величина приведеної вертикальної жорсткості в точці контакту;

l_{uu} – відстань між осями підрейкових опор залежно від епюри укладання шпал;

x_p – відстань від найближчої опори до точки прикладання навантаження, яка визначається з виразу $x_p = 5\ell_{uu} + \left(1 - \left\{\frac{x_{ni}}{\ell_{uu}}\right\}\right) \cdot l_{uu}$

Отже отримані таким чином значення пружних осідань всіх опор (значення опорних реакцій) враховують не тільки пружні (геометричні) характеристики рейок, підрейкових опор, а також і масу залізничної колії, яка бере участь у процесі вимушених коливань під дією зовнішніх навантажень.

В третьому розділі розроблені теоретичні підходи щодо визначення приведеної маси залізничної колії, математичний апарат для практичної оцінки величини цієї характеристики, а також проведено експериментальну перевірку отриманих результатів.

Для числової реалізації відповідно до задач даного дослідження було адаптовано математичну модель напружено-деформованого стану залізничної колії, яка була розроблена проф. Д.М. Курганом, на основі динамічної задачі теорії пружності.

Кінетична енергія пружної системи, яка складається з елементів масою dm , що деформуються зі швидкістю V_i , дорівнює

$$T = \int_m \frac{V_i^2}{2} dm. \quad (6)$$

Тоді, приведена маса системи буде дорівнювати зосередженій в точці масі, що рухається зі швидкістю точки приведення, та має таку ж саму кінетичну енергію, яку мають всі елементи пружної системи в процесі їх руху (деформації):

$$m_{np} = \frac{1}{z_0^2} \int_m z_i^2 dm, \quad (7)$$

де z_0 – вертикальний прогин в точці приведення (точка контакту колеса з рейкою);

z_i – вертикальна деформація i -го елемента, з яких складається система, для якої визначається приведення маса.

Для рейко-шпальної решітки:

$$m_{ршр} = \frac{2p_{ршр}^2}{g} \int_0^{\infty} (\cos k_z x + \sin k_z x)^2 \cdot e^{(-2k_z^0 x)} = \frac{3 \cdot p_{ршр}}{2 \cdot g \cdot k_z} \quad (8)$$

де $p_{ршр}$ – погонна маса рейко-шпальної решітки для однієї рейки (маса рейки, маса скріплень по одній рейці і маса половин шпал);

k – коефіцієнт відносної жорсткості підрейкової основи та рейки

Одним з базових елементів в запропонованій моделі є визначення геометрії поширення напружень (і відповідних деформацій) у півпросторі залізничної колії від дії зовнішнього навантаження (колій рухомого складу).

Геометрія поширення напружень описується множиною векторів $\{\vec{u}\}$.

Довжини векторів визначаються на кожному часовому кроці dt для всіх можливих напрямків поширення, які задаються кутами $\alpha \in [0; 0.5]$ і $\gamma \in [0; 2\pi]$, що описують півпростір (рис. 4).

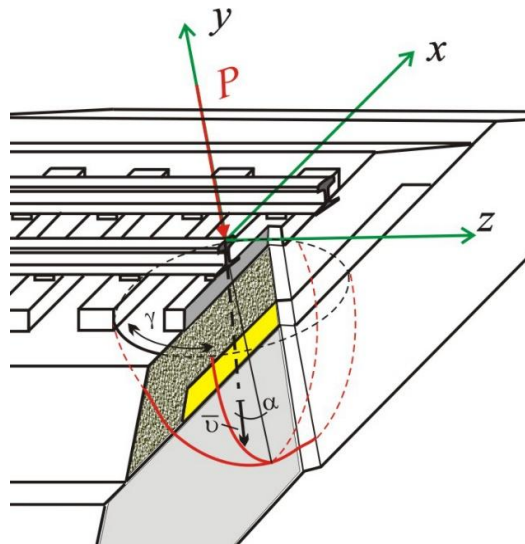


Рис. 4 – Вектор поширення деформацій у вибраній системі координат

Для практичної реалізації описаних розрахунків в математичну модель було додано відповідний розрахунковий модуль. Враховуючи прийняту в моделі структуру, розрахунок приведенної маси виконується в наступній послідовності.

1. До підшпальної основи відноситься 2 об'єкти системи: баластний шар (ω_0) і земляне полотно (ω_{zn}). Від сили, прикладеної до рейки, поширюються деформації і після декількох часових кроків моделювання передаються від подошви (і частково від бокових поверхонь) шпали до баласту. Подальше поширення деформацій формує розрахункові сфери (A_i), кожна з яких є простір між початками і кінцями векторів на поточному кроці розрахунку (рис. 5) з урахуванням обмежень границями об'єкту:

$$A_i = \{\vec{v}_j | \vec{v}_j \in \omega\} \quad (9)$$

Таким чином складаються активні (тобто ті, що беруть участь у взаємодії) обсяги об'єктів (баласту і земляного полотна):

$$\omega = \{A_i\} \quad (10)$$

2. Фіксується маса (повна) m_j і вертикальна деформація z_j кожного елемента, який бере участь у взаємодії.

3. Визначається приведена маса кожної сфери, з точкою приведення до її вертикальної осі

$$m_{np(i)} = \frac{1}{z_{0(i)}^2} \sum_j m_j z_j^2, \quad (11)$$

де $z_{0(j)}^2$ – вертикальна деформації сфери по осі (рис. 5).

3. Визначається приведена маса шару до точки контакту колеса і рейки

$$m_{np(\omega)} = \frac{1}{z_0^2} \sum_{i \in \omega} m_{np(i)} z_{0(i)}^2 \quad (12)$$

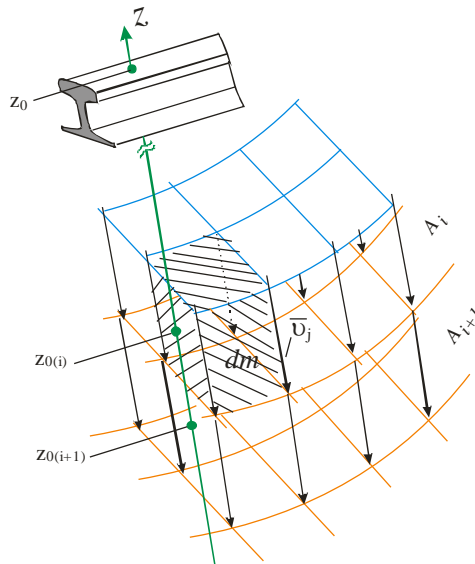


Рис. 5 – Розрахункова схема визначення приведеної маси

Вищенаведене дозволило створити інструментарій для практичного визначення приведених до точки контакту з колесом мас рейкошпальної решітки і підшпальної основи.

Варіюючи вихідними даними (в першу чергу, фізико-механічними характеристиками підшпальної основи) були проведені розрахунки, які дозволили встановити, що для умов магістральних залізниць величина приведеної маси залізничної колії знаходиться в межах 11÷15 кН. Крім того, отримані результати для різних співвідношень вихідних даних, дозволили уточнити вплив характеристик конструкції залізничної колії на величину приведеної маси підшпальної основи, а у загальному випадку – і на величину приведеної маси залізничної колії. Графічна інтерпретація наведена на рис. 6-11.

Так, наприклад, для наступного варіанту рейкошпальної решітки (рейки типу Р65, шпали залізобетонні з епюрою укладання 1840 шт/км, проміжне рейкове скріплення типу КПП-5) та підшпальної основи (баласт

щебеневий товщиною 50 см, з модулем деформації 200 МПа і щільністю 16 кН/м³; земляне полотно з ґрунту з модулем деформації 35 МПа і щільністю 14 кН/м³) значення їх приведених мас за результатами розрахунків складають відповідно 4380 та 8360 Н. Виходячи з чого, приведена маса залізничної колії за цим варіантом дорівнює 12,74 кН.

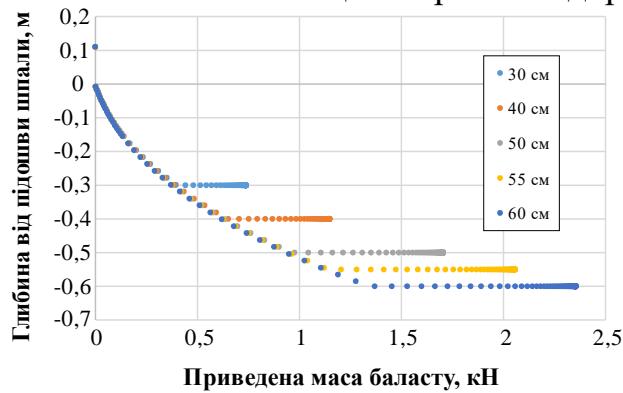


Рис. 6 – Залежність приведеної маси баласту від його товщини

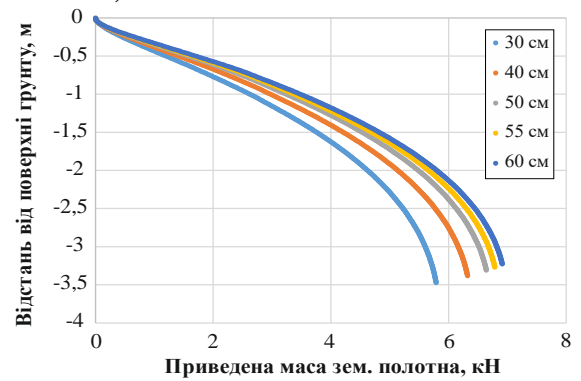


Рис. 7 – Залежність приведеної маси земляного полотна від товщини баласту

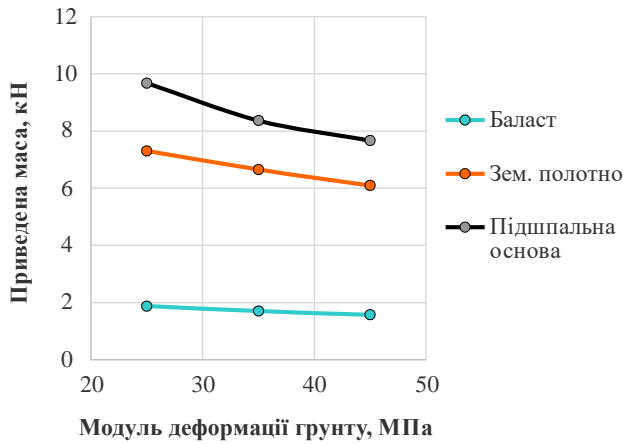


Рис. 8 – Залежності приведених мас баласту, земляного полотна, підшпальної основи від модуля деформації ґрунту

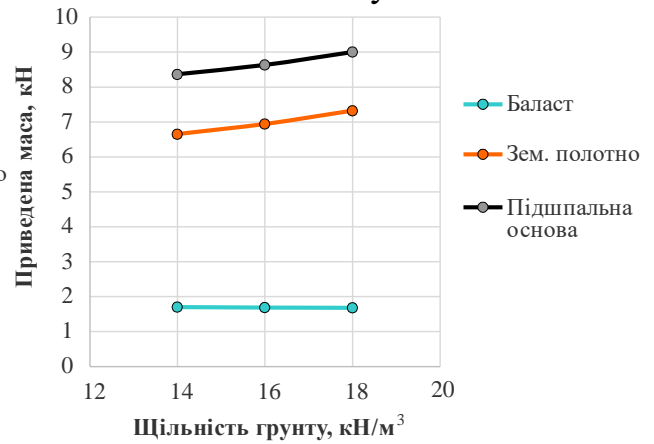


Рис. 9 – Залежності приведених мас баласту, земляного полотна, підшпальної основи від щільності ґрунту

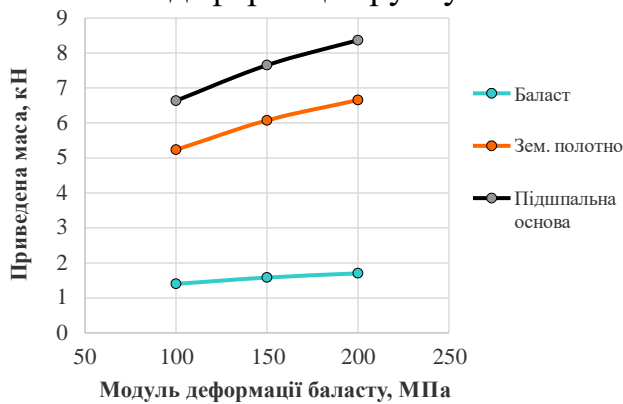


Рис. 10 – Залежності приведених мас баласту, земляного полотна, підшпальної основи від модуля деформації баласту

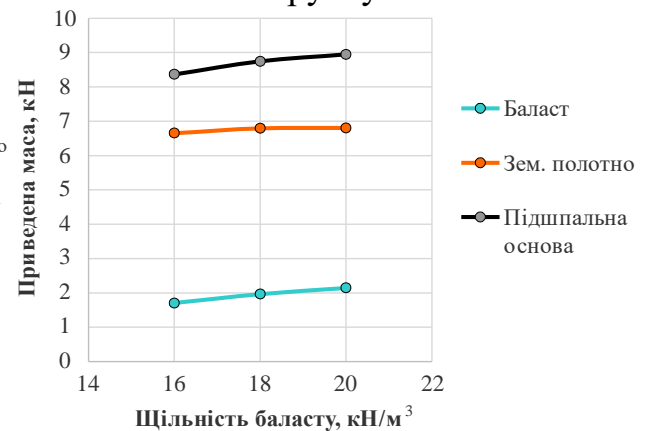


Рис. 11 – Залежності приведених мас баласту, земляного полотна, підшпальної основи від щільності баласту

Для оцінки адекватності розробленої математичної моделі було проведено експериментальні роботи по вимірюванню вертикальних прискорень в елементах залізничної колії на діючих ділянках регіональної філії «Південна залізниця». Фактичний стан колії на ділянках проведення експерименту знаходився у відповідності до вимог Правил технічної експлуатації залізниць України. Технічні характеристики (тип рейок, скріплень, баластного шару та ін.), були близькими до вихідних даних окремих варіантів проведених раніше теоретичних розрахунків.

Вимірювання прискорень в елементах залізничної колії проводилося за допомогою ADXL345 – мініатюрного акселерометру з високою роздільною здатністю і діапазоном вимірювання до $\pm 16g$. Модуль здатний вимірювати статичні прискорення, викликані гравітацією, а також динамічні прискорення, викликане рухом або ударами. Для настройки, обробки та реєстрації даних на базі акселерометра було розроблено пристрій з використанням мікроконтролера AVR ATmega328P. Запис даних проводився на карту пам'яті microSD. Принципова схема та загальний вигляд пристрою наведено на рис. 12.

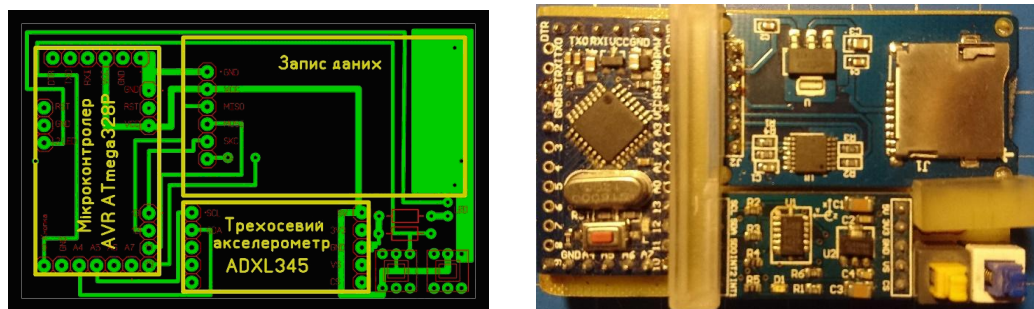


Рис. 12 – Принципова схема та загальний вигляд пристрою для вимірювання прискорень



Рис. 13 – Встановлення пристрою на підшву рейки.

отримати достатній обсяг вихідних даних для побудови акселерограм (рис. 14).

В обраному для спостережень перерізі колії за допомогою магніту на підшву кожної рейкової нитки (рис. 13) було встановлено по одному пристрою. В якості джерела коливань було використано динамічний стабілізатор колії ДСП-С4, технічні можливості якого, дали змогу моделювати зовнішнє динамічне поїзне навантаження. Вимірювання проводились серіями (в середньому протягом 15-20 секунд) у відповідності до робочих частот коливань стабілізатора, що дало змогу

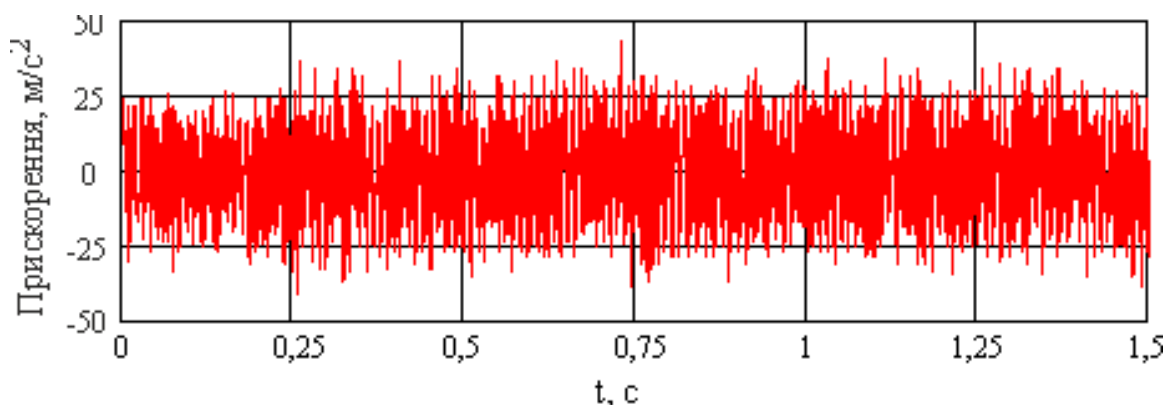


Рис. 14 – Фрагмент акселерограми.

Подальша статистична обробка, отриманих таким чином акселерограм, дозволила визначити спектральні характеристики, а також екстремальні значення прискорень в елементах залізничної колії.

Математичний апарат по визначенню приведеної маси залізничної колії в лабораторних умовах дозволив остаточно визначити цю величину, виходячи з отриманих даних експериментів.

Таблиця 1 – Узагальнена порівняльна таблиця результатів експериментальних робіт

№ дослідної ділянки	Приведена маса залізничної колії за результатами експериментів, кН	Приведена маса залізничної колії за теоретичними розрахунками, кН	Розбіжність між теоретичними та експериментальними результатами, %
1	12,35	11,96	3,2
2	13,24	12,18	7,9
3	12,96	11,96	7,7
4	12,87	12,18	5,3
5	13,04	12,18	6,5

Розбіжність між експериментальними та отриманими раніше теоретичними значеннями величини приведеної маси залізничної колії складає до 8% (табл.1), що свідчить про адекватність запропонованої моделі.

В четвертому розділі наведено результати, проведених числовими методами, досліджень по визначенню рівня вертикальних сил взаємодії залізничної колії та електропоїздів ЕКр1, НРCS2 та EJ 675.

З метою встановлення впливу приведеної маси залізничної колії на величину сил у вертикальній площині вихідні дані було розбито на дві групи. Єдиною відмінністю проведення розрахунків для варіантів першої групи (у порівнянні з другою) було відключення відповідних обчислювальних модулів для визначення приведеної маси залізничної колії. Всі інші вихідні дані були повністю ідентичними. В результаті проведених розрахунків (рис. 15) були отримані величини вертикальних сил взаємодії для обраних

рухомих одиниць в діапазоні швидкостей від 100 до 160 км/год., як із урахуванням приведеної маси залізничної колії, так і без неї.

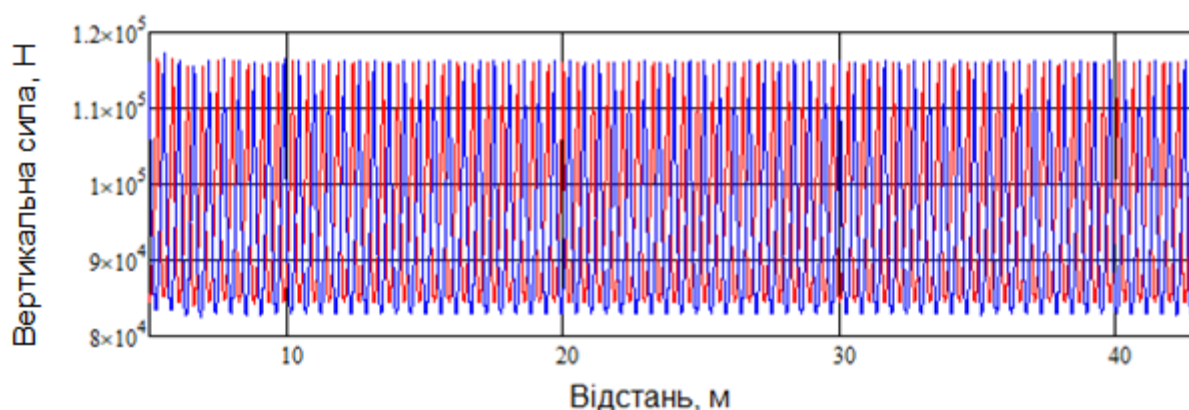


Рис. 15 – Приклад розрахунку вертикальних сил взаємодії із врахуванням приведеної маси залізничної колії для пасажирського електропоїзда HRCS2 при швидкості 130 км/год.

Проведені розрахунки показали, що приведена маса залізничної колії чине вплив на величину вертикальних сил взаємодії з рухомих складом. Встановлено загальне зменшення величини цих сил для всіх обраних типів електропоїздів. Мінімальне (у процентному відношенні) зменшення для всього діапазону швидкостей зафіксоване для електропоїзда HRCS2 (4-12%), максимальне – для Екр1 (7-17%). При швидкості руху 140 км/год рівень вертикальних сил для електропоїздів EJ675, HRCS2, ЕКр1 знижується відповідно на 13, 11 та 15%.

Узагальнені результати розрахунків зведено в табл. 2

Таблиця 2 – Максимальні значення вертикальних сил при швидкостях руху 100-160 км/год

Тип рухомої одиниці	Максимальні вертикальні сили P_{\max} без врахування приведеної маси колії, кН	Максимальні вертикальні сили P_{\max} із врахуванням приведеної маси колії, кН
EJ 675	143,7 – 175,2	136,7 – 149,1
HRCS2	112,8 – 143,3	108,4 – 126,7
ЕКр1	139,1 – 169,6	129,9 – 141,4

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведені в дисертаційній роботі теоретичні та експериментальні дослідження дозволили вирішити актуальну науково-технічну задачу по встановленню впливу приведеної маси колії на рівень сил взаємодії залізничної колії і рухомого складу у вертикальній площині в експлуатаційних умовах магістральних залізниць. Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

1. Для вибору математичної моделі для даного дослідження проведено аналіз розвитку теорії розрахунків взаємодії залізничної колії та рухомого складу. Встановлено факт поступового відходу від використання в сучасних математичних моделях розрахункової схеми залізничної колії у вигляді балки на суцільній пружній основі. Результати проведеного аналізу також свідчать про складність формування вимог (надання рекомендацій) для вибору математичних моделей при проведенні відповідних досліджень, виходячи з постійного розвитку фізико-математичних засобів розрахунків та комп'ютерних систем їх реалізації. В якості однієї з альтернатив можливе використання просторових моделей, в яких залізнична колія розглядається як балка, що спирається на окремі опори з нелінійними пружно-дисипативними характеристиками.

2. Адаптовано комплекс математичних моделей просторової динамічної системи «екіпаж-колія». Внесені в розрахункову модель екіпажа та систему диференціальних рівнянь зміни враховують особливості конструкції електропоїздів EJ675, HRCS2, ЕКр-1 (зокрема наявність двох ступенів ресорного підвішування). Рішення диференціального рівняння вертикальних переміщень рейки під дією зовнішнього вертикального навантаження, що змінюється по гармонійному закону, дозволило визначити опорні реакції із урахуванням маси залізничної колії.

3. Величину приведеної маси залізничної колії (зокрема підшпальної основи) визначено з використанням просторової моделі динамічних деформацій залізничної колії на основі теорії пружності з урахуванням меж простору, що бере участь у коливаннях кожної рейкової опори в розрахунковий момент часу. Для залізничної колії з рейками типу Р65 на залізобетонних шпалах, в залежності від значень інших характеристик, величина приведеної маси знаходиться в межах $11 \div 15$ кН. Проведені експериментальні роботи в польових умовах показали задовільну достовірність отриманих результатів (розбіжність в межах $3 \div 8\%$)

4. Встановлено, що величина приведеної маси підшпальної основи прямо пропорційна модулю деформації баластного шару (його товщині, щільності), щільності ґрунту земляного полотна, а також обернено залежна від модуля деформації ґрунту земляного полотна. При зміні модуля деформації баластного шару в інтервалі $100 \div 200$ МПа величина приведеної маси збільшується від 6,63 до 8,36 кН. У випадку збільшення товщини баласту (від 30 до 60 см.) та його щільності (від 16 до 20 кН) величина приведеної маси знаходиться відповідно в межах $0,45 \div 1,37$, та $8,41 \div 8,94$ кН. Зміна модуля деформації ґрунту земляного полотна від 25 до 45 МПа призводить до зменшення величини приведеної маси з 9,67 до 7,66 кН

Швидкість руху починає впливати на величину приведеної маси залізничної колії при значеннях більше 240 км/год для конструкцій з низьким модулем пружності підрейкової основи.

5. Проведені багатоваріантні числові дослідження сил взаємодії залізничної колії та електропоїздів EJ675, HRCS2, ЕКр-1 дозволили

встановити, що величина приведеної маси колії чине вплив на рівень сил у вертикальній площині.

Врахування цієї інерційної характеристики дозволяє точніше (на 4-17%) розраховувати величину вертикальних сил взаємодії залізничної колії і рухомого складу при швидкостях руху 100-160 км/год.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях та збірниках наукових праць, що включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Kurhan, D., Leibuk, Y. Research of the Reduced Mass of the Railway Track. *Acta Technica Jaurinensis*. 2020. 13(4). pp. 324–341.

Особистий внесок: аналіз результатів числових досліджень величини приведеної маси залізничної колії.

2. Лейбук Я.С., Скорик О.О., Муригіна Н.О., Зверева А.С. Експериментальне визначення приведеної маси колії. *Збірник наукових праць «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика»*. 2019. № 15. С. 41–46.

Особистий внесок: проведення експериментальних робіт, обробка та аналіз результатів. – щц

3. Даренський О.М., Шраменко В.П., Тулей Ю.Л., Дудін О.А., Лейбук Я.С. Математична модель колії, яка має інерційні характеристики, під дією швидкісного рухомого складу. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. №4. С. 35–40.

Особистий внесок: складання рівнянь прогинів підрейкових опор під дією зовнішнього навантаження для визначення приведеної вертикальної жорсткості рейкової нитки в точці контакту з урахуванням розподіленої маси залізничної колії.

4. Даренський О.М., Тулей Ю.Л., Овчинніков О. О., Лейбук Я.С. Числові дослідження динамічних поперечних сил у кривих, у зонах нерівностей ланок колії. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2018. Вип. 179. С. 51–58.

Особистий внесок: визначення впливу непогашених прискорень на величину сил взаємодії залізничної колії та рухомого складу в кривих ділянках колії.

5. Даренский А.Н., Лейбук Я.С. Математическая модель колебаний железнодорожного пути как балки, которая имеет инерционные характеристики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. №2. С. 16–20.

Особистий внесок: вирішення диференціальних рівнянь коливань залізничної колії під дією вертикальних навантажень.

6. Dmytro Potapov, Sergij Panchenko, Yaroslav Leibuk, Yuseph Tuley, Pavel Plis Effect of joint and isolated irregularities of the track on the wear of rails in curves. *MATEC Web of Conferences* 230. 2018. 01012.

Особистий внесок: розрахунок сил взаємодії залізничної колії і рухомого складу при різних типах проміжних рейкових скріплень.

7. Alexander Darenskiy, Volodymyr Vitolberg, Denis Fast, Andrii Klymenko, Yaroslav Leibuk A mathematical model of the rail track presented as a bar on elastic and dissipative supports under the influence of moving loads. *MATEC Web of Conferences* 116. 2017. 03002

Особистий внесок: складання загальних рівнянь вільних та вимушених коливань балки, яка має розподілену масу з урахуванням роботи залізничної колії під дією зовнішніх навантажень.

Публікації апробаційного характеру

1. Даренський О.М., Лейбук Я.С., Клименко А.В. Математична модель коливань залізничної колії як балки, яка має інерційні характеристики. *6-а Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті»*. 2017. Харків: УкрДУЗТ. С. 196–197.

Особистий внесок: критичний аналіз розрахункових схем залізничної колії, які враховують її коливання у вертикальній площині

2. Лейбук Я.С. Вынужденные колебания пути как балки, которая имеет инерционные характеристики. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Тези доповідей 80-ї Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті»*. 2018. С. 109.

3. Даренський О.М., Лейбук Я.С. Чисельні дослідження динамічних поперечних сил в кривих, в зонах нерівностей ланок колії. *7-а Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті»*. 2018. С. 35–36.

Особистий внесок: проведення розрахунків, аналіз результатів.

4. Лейбук Я.С., Скорик О.О. Визначення приведеної маси колії за допомогою динамічного стабілізатора колії. *79 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*. 2019. С. 240–242.

Особистий внесок: розробка методики проведення експериментальних робіт, обробка та аналіз результатів.

5. Лейбук Я.С. Урахування інерційних характеристик колії при визначенні сил її взаємодії з рухомим складом. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Тези доповідей 78-ї Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті»*. 2016. С. 91–92.

АНОТАЦІЯ

Лейбук Я. С Дослідження впливу інерційних характеристик колії на процеси взаємодії з рухомим складом. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.06 – залізнична колія (27 – транспорт). – Український державний університет залізничного транспорту, Харків, 2021.

Дисертація присвячена дослідженню впливу приведеної маси колії на рівень сил взаємодії залізничної колії і пасажирського рухомого складу у вертикальній площині в експлуатаційних умовах магістральних залізниць.

Проведено аналіз математичних моделей для визначення сил взаємодії залізничної колії та рухомого складу для різних умов експлуатації. Він показав, що можливе використання комбінацій моделей, які побудовані на плоских розрахункових схемах статичної рівноваги, або просторових систем на базі розрахункових схем динамічної рівноваги на основі принципу Лагранжа-д'Аламбера. Також до одного з висновків проведеного аналізу можна віднести поступовий відхід від використання в математичних моделях розрахункової схеми залізничної колії у вигляді балки на суцільній пружній основі.

В комплекс математичних моделей просторової динамічної системи «екіпаж-колія», яка була розроблена для умов залізниць незагального користування, були внесені зміни, які враховують особливості конструкції пасажирських електропоїздів ЕКр1, НРCS2, EJ675, а також вимушені коливання залізничної колії, з урахуванням її приведеної маси, у вертикальній площині під дією зовнішніх навантажень.

На основі динамічної задачі теорії пружності теоретично визначено величину приведеної маси залізничної колії з урахуванням геометрії поширення напружень (відповідних динамічних деформацій) у півпросторі, який залучений до взаємодії з рухомим складом. Встановлено, що основними факторами, які впливають на приведену масу підшпальної основи (зокрема і на приведену масу залізничної колії в цілому) є: товщина баластного шару, модулі деформації та щільності баласту і земляного полотна. Швидкість руху має вплив тільки починаючи з високих рівнів (від 240 км/год і вище) для конструкцій з низьким модулем пружності підрейкової основи. Для залізничної колії з рейками типу Р65 на залізобетонних шпалах в залежності від значень інших характеристик величина приведеної маси залізничної колії знаходиться в межах 11–15кН.

Проведена верифікація отриманих теоретично величин приведеної маси залізничної колії на діючих ділянках магістральних залізниць. Співставлення даних експериментальних робіт з результатами теоретичних досліджень показало задовільну збіжність (розбіжність до 5-8%).

Досліджено числовими методами сили взаємодії пасажирських електропоїздів ЕКр1, НРCS2, EJ675 та залізничної колії у вертикальній площині. Були отримано величини вертикальних сил взаємодії для обраних рухомих одиниць в діапазоні швидкостей від 100 до 160 км/год., як із урахуванням приведеної маси залізничної колії, так і без неї. Встановлено, врахування цієї інерційної характеристики дозволяє точніше (на 4-17%) розраховувати величину вертикальних сил взаємодії залізничної колії і рухомого складу при швидкостях руху 100-160 км/год

Ключові слова: залізнична колія, приведена маса, підшпальна основа, ділянки прискореного руху, математична модель взаємодії залізничної колії і рухомого складу, безпека руху поїздів

ANNOTATION

Yaroslav Leibuk Investigation of the influence of track inertial characteristics on the processes of interaction with rolling stock. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.22.06 - a railway track (27 - transport). - Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to the research of the influence of the reduced mass of the track on the level of forces of interaction of the railway track and passenger rolling stock in the vertical plane in the operating conditions of the main railways.

The analysis of mathematical models for determination of forces of interaction of a railway track and a rolling stock for various operating conditions is carried out. He showed that it is possible to use combinations of models that are based on flat calculation schemes of static equilibrium, or spatial systems based on calculation schemes of dynamic equilibrium based on the principle of Lagrange-d'Alembert. Also, one of the conclusions of the analysis can be attributed to the gradual departure from the use in mathematical models of the calculation scheme of the railway track in the form of a beam on a solid elastic basis.

The complex of mathematical models of the spatial dynamic system "vehicle-track", which was developed for the conditions of non-public railways, has been modified to take into account the design of passenger electric trains EKr1, HRCS2, EJ675, as well as forced railway track oscillations, taking into account its lead, in the vertical plane under the action of external loads.

Based on the dynamic problem of the theory of elasticity, the value of the reduced mass of the railway track is theoretically determined taking into account the geometry of stress propagation (corresponding dynamic deformations) in the half-space involved in the interaction with the rolling stock. It is established that the main factors influencing the reduced mass of the sleeper base (in particular and the reduced mass of the railway track as a whole) are: the thickness of the ballast layer, modulus of deformation and density of ballast and subgrade. The speed of movement has an effect only starting from high levels (from 240 km / h and above) for structures with a low modulus of elasticity of the subrail base. For a railway track with R65 rails on reinforced concrete sleepers, depending on the values of other characteristics, the value of the reduced mass of the railway track is in the range of 11–15 kN.

Verification of the theoretically obtained values of the reduced mass of the railway track on the existing sections of the main railways is carried out. Comparison of the data of experimental works with the results of theoretical research showed satisfactory convergence (discrepancy up to 5-8%).

The force of interaction of passenger electric trains EKr1, HRCS2, EJ675 and the railway track in the vertical plane has been investigated by numerical methods. The values of the vertical forces of interaction for the selected mobile units in the speed range from 100 to 160 km/h were obtained, both taking into

account the reduced mass of the railway track and without it. It is established that taking into account the reduced mass of the railway track, the magnitude of the vertical forces is reduced by 4-17%.

Keywords: railway track, reduced mass, underburden base, sections of accelerated traffic, mathematical model of interaction of railway track and rolling stock, train safety

Підписано до друку 22.03.2021 р. Формат 60x90 1/16.
Папір офсетний. Друк лазерний.
Набір комп'ютерний. Умовн. др. арк. 0,9.
Наклад 110 прим. Зам. № 2503/02.

Надруковано ФОП Гузік О.М.
Реєстраційний номер №2705814113
м. Київ, вул. Б. Гаврилишина, 16
Тел.: 338-16-61.