

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ

**Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна**

СИСИН МИКОЛА ПЕТРОВИЧ

УДК 625.1.033.004.12

**ВПЛИВ ФІЗИЧНИХ ТА ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ НА ЇЇ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН**

Спеціальність 05.22.06 – залізнична колія

АВТОРЕФЕРАТ

**дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Дніпропетровськ – 2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Колія та колійне господарство» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
РИБКІН Віктор Васильович,
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
Міністерства транспорту та зв'язку України,
завідувач кафедри «Колія та колійне господарство».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
РАДЧЕНКО Микола Олексійович
Інститут транспортних систем і технологій НАН України
Міністерства транспорту та зв'язку України,
м. Дніпропетровськ,
старший науковий співробітник;

кандидат технічних наук, доцент
ШРАМЕНКО Володимир Павлович,
Українська державна академія залізничного транспорту
Міністерства транспорту та зв'язку України, м. Харків,
завідувач кафедри «Колія та колійне господарство».

Захист відбудеться “__” _____ 2008 р. о __ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. В.А. Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Автореферат розіслано “__” _____ 2008 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д.т.н., професор

М. О. Костін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Залізничний транспорт відіграє важливу роль у повсякденному житті людей і є вирішальним фактором, який впливає на економічний розвиток та зайнятість людей в країнах Західної, Центральної і особливо Східної Європи, де він займає монопольну позицію серед інших видів транспорту. На даний час в ряді країн Європи залізничний транспорт стає менш конкурентноздатним та рентабельним відносно інших видів транспорту. Однією із причин цього є відносно великі затрати на інфраструктуру, в яких велику вагу мають затрати на модернізацію та утримання залізничної колії порівняно з іншими видами транспорту. Тому в рамках програм розвитку Європейського Союзу ставляться цілі, які визначають сучасні вимоги до залізничного транспорту, а також до міжнародних транспортних коридорів. Однією із головних вимог є створення високоефективної, конкурентноздатної та рентабельної інфраструктури залізничної колії при підвищенні швидкостей на міжнародних транспортних коридорах та скорочення часу доставки пасажирів і вантажів.

Підвищення швидкостей руху при змішаному вантажному та пасажирському русі потребує знання умов подальшої експлуатації колії та допустимих швидкостей руху, що вимагає уточнення методів розрахунку залізничної колії. Одними з найсуттєвіших напрямків уточнення є врахування у розрахунках фактичного стану колії, виміряного колієвимірювальними засобами, а також встановлення необхідної пружності рейкового скріплення за критеріями впливу її на роботу баласту та земполотна. Для розв'язання практичних проблем реконструкції та експлуатації колії використовують методику розрахунку колії на міцність, яка дозволяє проводити практичний розрахунок навантажень, напружень і деформацій в елементах верхньої будови колії. З 1954 року використовують методику інженерного розрахунку колії на міцність, яка у достатньому рівні задовольняла вимоги до неї колійного господарства того часу. За проміжок часу 50 років з моменту затвердження існуючих правил розрахунку колії на міцність відбулися значні зміни у конструкції колії, рухомому складі та швидкостях руху, з'явилася можливість врахувати додаткові фактори, що впливають на напружено-деформований стан. Одним із найбільших недоліків такої методики було відсутність врахування фактичного геометричного стану колії. Ізольована нерівність на колії була прийнята сталою, яка може виникнути на колії певної конструкції під певним навантаженням та не залежить від фактичного стану колії виміряного колієвимірювальними засобами, а також залишається постійною протягом усього періоду експлуатації колії. Врахування фактичної нерівності колії у розрахунку колії на міцність дасть можливість визначити фактичні сили дії на колію та напруження у її елементах. Це, в свою чергу, дасть можливість встановлювати допустимі навантаження поїздів на колію, підбирати оптимальну конструкцію колії при заданих умовах експлуатації.

У зв'язку з вищевикладеним оцінка фактичних геометричних та фізичних характеристик колії при визначенні її напружено-деформованого стану, як із експериментальних досліджень, так і за якісним станом колії, що визначається

чинною класифікацією геометричного стану колії залізниць України, є актуальною задачею теоретичних та практичних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Представлена дисертаційна робота тісно пов'язана із науково-дослідними роботами кафедри «Колія і колійне господарство» та колієвипробувальної галузевої науково-дослідної лабораторії Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, в яких автор брав участь як виконавець окремих розділів. Методики та моделі, що були розроблені у межах дисертаційної роботи, були застосовані в науково-дослідних роботах, що виконувались за завданням Головного управління колійного господарства Укрзалізниці за такими темами.

1. Проведення динаміко-міцнісних випробувань колії на залізобетонних шпалах з пружинними скріпленнями КПП, рейками UIC-60 та розробка рекомендацій по встановленню швидкостей руху поїздів. Тема № 53.148.03-205/03-9.03. ЦТех, державний реєстраційний номер 0103U007770, розділ 2.

2. Розробка рекомендацій щодо швидкостей руху поїздів по ділянці колії, відремонтованій із застосуванням сучасних колійних машин RM-80, ВПР-09 та динамічного стабілізатора колії. Тема №555/03-61/03-ЦТех, державний реєстраційний номер 0104U003101, розділ 3.

3. Розробка та обґрунтування технічних параметрів і характеристик рейкових скріплень для залізобетонних шпал. Тема №629/04-46/04-ЦТех, державний реєстраційний номер 0106U010226, розділи 1, 2.

4. Дослідження та розробка рекомендацій щодо швидкостей руху поїздів в кривих ділянках колії, відремонтованих при тривалому закритті перегону із застосуванням сучасних колійних машин. Тема №1/06-ЦТех-22/06-ЦЮ, державний реєстраційний номер 0106U011747, розділи 2, 3.

5. Розробка нормативно-технічного документа «Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість» ЦП-0117 затвердженого наказом Укрзалізниці від 13.12.2004 р. № 960-ЦЗ.

Мета роботи.

Підвищення показників міцності, надійності та працездатності залізничної колії при її проектуванні та встановленні умов її експлуатації за рахунок врахування фактичних геометричних та фізичних характеристики залізничної колії шляхом розробки методики визначення напружено-деформованого стану колії у вертикальній площині.

Задачі дослідження.

1. Провести системний аналіз існуючих експериментальних та розрахункових методик визначення напружено-деформованого стану залізничної колії та виміру її геометричних і фізичних характеристик.

2. Виконати оцінку розподілу геометричних нерівностей колії у вертикальній площині на залізницях України та його взаємозв'язку із існуючою бальною оцінкою стану колії.

3. Розробити математичну модель взаємодії колії та рухомого складу при проходженні вертикальних нерівностей колії.

4. Виконати комплексну оцінку впливу геометричних та фізичних параметрів залізничної колії у вертикальній площині на параметри її напружено-деформованого стану, а також розробити методики визначення вертикальної геометрії колії та фізичних характеристик пружності підрейкової основи під фактичними навантаженнями від рухомого складу.

5. Провести експериментальну перевірку розробленої теоретичної моделі і розрахункових методик визначення параметрів залізничної колії, та розробити практичні рекомендації з удосконалення існуючих методик інженерного розрахунку колії на міцність для урахування геометричного стану колії у вертикальній площині.

Об'єкт дослідження – процеси взаємозв'язку напружено-деформованого стану колії із нерівностями на колії та пружністю елементів колії.

Предмет дослідження – залізнична колія, а саме, напружено-деформований стан колії як результат взаємодії колії та рухомого складу.

Методи дослідження. В дослідженнях по моделюванню використано метод кінцевих різниць, метод кінцевих елементів та методи чисельного розв'язання систем звичайних диференціальних рівнянь. В дослідженнях по ідентифікації параметрів колії використано методи теорії обробки зображень і методи нечіткої логіки.

Натурні вимірювання напружень у рейках було здійснено за допомогою методу трьох точок та методу Шлумфа; натурні вимірювання поперечних зусиль у рейках – за допомогою системи із чотирьох тензодатчиків; натурні вимірювання деформацій колії – за допомогою розробленого безконтактного фотографічного виміру прогину рейки та вимірювання нелінійної пружності підрейкової основи із використанням розробленої методики.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розроблено нові математичні моделі взаємодії колії і рухомого складу та методики визначення фактичних геометричних і пружних характеристик досліджуваної ділянки залізничної колії, які, на відміну від попередніх моделей та методик, враховують нелінійну пружність окремих опор у взаємодії колії та рухомого складу, що дає можливість адекватно відобразити динамічні процеси у залізничній колії, базуючись на експериментальних дослідженнях.

2. Вперше встановлено закономірності імовірнісного розподілу параметрів геометричних нерівностей колії у вертикальній площині та їх зв'язок з існуючою бальною оцінкою стану колії, що дає можливість враховувати у розроблених моделях узагальнений геометричний стан одного кілометра колії у відповідності до існуючої класифікації якісної оцінки стану колії.

3. Отримано та проаналізовано нові співвідношення напружено-деформованого стану колії та параметрів ізольованої нерівності на ній, які вперше дозволили оцінити вплив якісного стану колії на роботу колії під навантаженням рухомого складу.

4. Вперше використано при оцінці необхідної пружності рейкових скріплень критерій вібраційного розладнання баластного шару, який дозволяє уточнити оцінку впливу вертикальної пружності колії та її елементів на її роботу під динамічним навантаженням.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблена у даній роботі інженерна методика розрахунку сил дії на колію необресорених мас дає можливість врахування як загального стану колії у вертикальній площині вираженого бальною оцінкою, так і конкретних геометричних нерівностей, виміряних сучасним засобом визначення геометричного стану колії – вагоном-колівимірювачем. Ця методика була використана при розробці рекомендацій щодо внесення змін до діючих на залізницях України «Правил розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість» ЦП-0117, які використовуються технічними відділами підприємств колійного господарства, лабораторіями та конструкторськими бюро.

2. Обґрунтовані у роботі технічні параметри і характеристики рейкових скріплень для залізобетонних шпал по критеріях впливу на роботу рейок, баластного шару та земполотна дають можливість підбирати найефективніші рейкові скріплення з точки зору зменшення розладнань колії.

3. Розроблено рекомендації щодо встановлення швидкостей руху поїздів в кривих ділянках колії, що були відремонтовані при тривалому закритті перегону із застосуванням сучасних колійних машин RM-80, ВПР-09 та динамічного стабілізатора DGS.

4. Розроблена в дисертації нова методика визначення параметрів вертикальної нелінійної пружності підрейкової основи під дією фактичних динамічних навантажень від рухомого складу дає можливість визначити параметри пружності колії, її нелінійні характеристики та її розподіл вздовж осі колії. Ця методика використовується для проведення досліджень у колієвипробувальній лабораторії ДНУЗТ.

5. Розроблена в дисертації методика безконтактного виміру прогину рейки фотографічним методом, на відміну від традиційного методу виміру тензOMETРИЧНИМ прогиноміром, дає можливість виключити систематичну похибку виміру прогину, яка може досягати 50-100% від середнього значення прогину, та була впроваджена у колієвипробувальній лабораторії ДНУЗТ.

6. Розроблена методика по визначенню фактичної вертикальної нерівності колії по вимірах вагона-колівимірювача дозволяє отримати необхідну для подальших розрахунків достовірну інформацію про геометрію колії та неодноразово була використана у дослідженнях у колієвипробувальній лабораторії ДНУЗТ.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій. Усі результати дослідження та розроблені рішення підтверджено експериментальними дослідженнями та натурними вимірами на дослідних ділянках колії. Виконані дослідження тісно пов'язані із роботою колієвипробувальної лабораторії ДНУЗТ, тому вони пройшли критичну наукову оцінку та отримали реальне практичне застосування у висновках та рекомендаціях.

Особистий внесок здобувача.

Автором дисертаційної роботи особисто було виконано планування та проведення теоретичних та експериментальних досліджень, збір статистичних даних та обробку отриманого матеріалу. Постановку мети і задачі дослідження виконано спільно з науковим керівником. В публікаціях, в яких відображено

основні результати дисертації та які написані у співавторстві, автору належить: в [2] – розробка математичної моделі динамічної взаємодії колії та рухомого складу, з допомогою якої виконувалося дослідження силової дії на колію при проходженні рухомим складом нерівностей на колії; в [3, 5, 9] –пропозиції по коригуванню аналітичних виразів та значень відповідних коефіцієнтів у розрахунку колії на міцність для урахування впливу фактичної геометричної нерівності; в [1] – збір даних по стану колії у вертикальній площині на типових конструкціях верхньої будови колії, що використовуються на залізницях України та встановлення зв'язку у табличній формі між якісним станом та бальною оцінкою одного кілометра колії і параметрами характерної геометричної нерівності; в [6, 8, 11] – розробка методики визначення характеристик пружності підрейкової основи та їх розподілу вздовж колії під фактичними навантаженнями від рухомого складу; в [10, 11] – розробка методики безконтактного виміру прогину рейки фотографічним методом; в [1, 4, 8] – розробка методики визначення фактичної вертикальної нерівності колії по вимірах вагона-колієвимірювача.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення і результати дисертації доповідались на наступних міжнародних конференціях та семінарах: 1-й міжнародній конференції європейських студентів транспорту та транспортних наук «Mobility and Traffic Management in a Networked World» м. Дрезден, Німеччина, 2003 р.; «Проблеми взаємодії колії та рухомого складу», м. Дніпропетровськ, 2003 р.; 1-й та 2-й «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка та управління», м. Київ 2003 р., 2004 р.; у семінарі аспірантів та молодих вчених «Perner's contact 2004», м.Пардубіце, Чехія, 2004; IX міжнародній конференції «Проблеми механіки залізничного транспорту», м. Дніпропетровськ, 2004 р.; «Современные проблемы путевого комплекса», м. Москва, 2004р.; 65-ій, 66-ій, 67-ій «Сучасні проблеми залізничного транспорту», м. Дніпропетровськ, 2005 р., 2006 р., 2007 р.; міжкафедральному семінарі «Вплив фізичних та геометричних характеристик залізничної колії на її напружено-деформований стан», м. Дніпропетровськ, 2007 р.

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано в 11 наукових працях, у тому числі: 4– у фахових виданнях, 7 – у матеріалах міжнародних науково-практичних конференцій.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і 4 додатків. Повний обсяг складає 254 сторінок друкованого тексту, в тому числі: 104 рисунки викладено на 44 сторінках, 30 таблиць - на 12 сторінках, список літератури з 147 найменувань займає 15 сторінок, та 4 додатки викладено на 30 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* проведено обґрунтування актуальності теми досліджень, сформульовано мету та визначено цілі досліджень, відображено наукову та практичну новизну результатів, вибрано методику досліджень.

У *першому розділі* проводиться узагальнюючий історичний огляд розвитку методів розрахунку колії на міцність та взаємодії колії та рухомого складу і виконано аналіз існуючого стану вітчизняних і зарубіжних досліджень по проблемах взаємодії колії та рухомого складу, а також сучасні тенденції досліджень. Коротко приведено суть сучасних методів та засобів визначення фізичних та геометричних характеристик колії і методики теоретичного та експериментального визначення напружено-деформованого стану колії.

Питання безпеки та ефективності перевезень по залізничній колії, збільшення осьових навантажень та швидкостей руху поїздів, які почали виникати разом із зародженням залізничного транспорту, приводили до відповідного розвитку методів розрахунку її міцності та надійності. Починаючи із середини ХІХ ст. цим проблемам присвятили свої роботи численні вітчизняні та зарубіжні вчені, такі як: Е. Вінклер, П.П. Мельников, Г. Ціммерман, Н.П. Петров, С.П. Тимошенко та інші, які заклали основу методів розрахунку залізничної колії. У дослідженнях М.А. Чернишова, М.Ф. Вериги, В.Н. Данилова, Е.М. Бромберга, М.А. Фрішмана, Г.М. Шахунянца, В.Д. Дановича, О.П. Єршкова, О.Я. Когана, В.А. Лазаряна та інших розглянуто питання взаємодії колії і рухомого складу, систематизовано існуючі знання у загальні методики розрахунку міцності та стійкості колії. У останні десятиліття численні науково-дослідні інститути і вищі навчальні заклади виконують комплексні дослідження по підвищенню ефективності використання ресурсу залізничної колії та раціоналізації колійного господарства. Провідними вченими, роботи яких були присвячені цим та іншим питанням є В.Г. Альбрехт, Л.С. Блажко, Ю.Д. Волошко, Е.І. Даніленко, Г.Г. Коньшин, В.С. Лисюк, В.О. Певзнер, В.В. Рибкін, В.Ф. Яковлев, Т.Г. Яковлева та інші.

Аналіз сучасного стану та виконаних до теперішнього часу досліджень у цьому напрямку показав, що у існуючих до даного часу методиках присутній ряд недоліків, припущень та узагальнень, які з тих чи інших причин не були вирішені раніше. Проблеми нашого часу вимагають по новому розглянути складну та різнобічну стару задачу розрахунків колії на міцність.

У *другому розділі* виконано статистичний аналіз даних про нерівності колії, що виникають на типових для України конструкціях колії, запропоновано та перевірено з використанням методів математичної статистики закони розподілу глибини та довжини вертикальних ізольованих геометричних нерівностей, знайдено значення характерної глибини та довжини нерівності для кожного якісного стану колії при заданому ступені ймовірності їх виникнення.

При зборі та аналізі даних враховувались наступні передумови.

1. Збір даних було здійснено за результатами контрольних вимірів комп'ютеризованого вагона-колієвимірювача типу КВЛ-П.

2. У якості основного запису вагона-колієвимірювача, що представляє стан колії у вертикальній площині, прийнято записи осідань.

3. Конструкція колії, на якій проводили вимірювання, відповідає найпоширенішій типовій конструкції залізниць України – безстикова із рейок типу Р65, на щебеневому баласті і залізобетонних шпалах, епюра шпал в прямих і кривих 1840 шт/км.

4. Рівень ймовірності виникнення нерівності, у якої одночасно велика глибина та мала довжина, приймається рівним $1 - 0,994 = 0,006$, що відповідає існуючій методиці розрахунку колії на міцність для визначення максимально ймовірних сил. Окремо для глибини та довжини відповідає ймовірність $1 - \sqrt{0,006} = 0,9225$.

Для отримання кількісної величини характерної глибини та довжини нерівності для кожного якісного стану колії було сформульовано, обґрунтовано та перевірено із допомогою методик перевірки статистичних гіпотез (критерію Колмогорова-Смірнова) закон розподілу глибин осідань – закон розподілу ймовірності Гамма:

$$F(x|a,b) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} x^{a-1} e^{-\frac{x}{b}}, \quad (1)$$

де a, b – параметри закону;

$\Gamma(a)$ – Гамма-функція;

x – незалежна змінна (глибина осідання).

Для усієї статистики досліджуваних даних параметри закону Гамма: $a=13,223$, $b=0,7422$ та їх середньоквадратичні відхилення при надійності 95%: $\sigma_a=0,477$, $\sigma_b=0,0273$. Таким чином, відносна похибка складає менш, ніж 5%, що цілком прийнятно для практичних інженерних розрахунків.

Кожному якісному стану 1 км колії відповідає різний розподіл глибин осідань. Аналіз глибин осідань для різних якісних станів колії показує, що при гіршому стані колії трапляється більше глибоких нерівностей, що відображено на графіках густини розподілу ймовірності глибини осідання (рис. 1). Такий статистичний аналіз дає можливість встановити значення глибин осідань, що характерні для кожного якісного стану колії при заданій ймовірності їх перевищення.

У таблиці 1 показано такі глибини осідань при рівні статистичної значимості 0,95 та прийнятій ймовірності перевищення максимальної глибини $1 - 0,9225$.

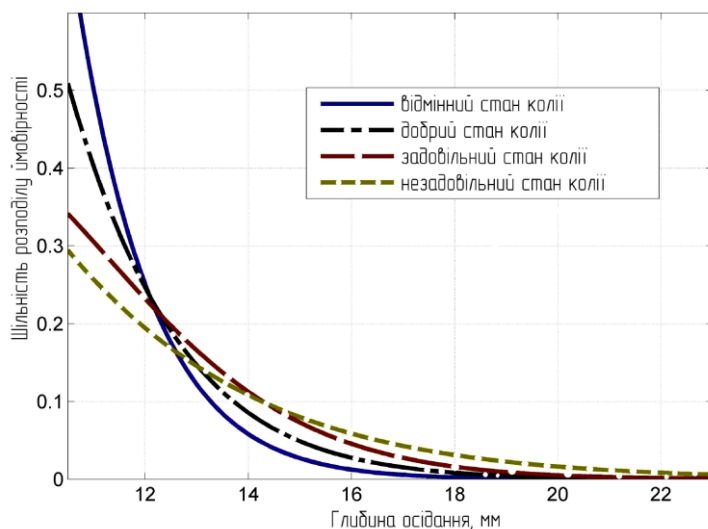


Рис. 1 – Графіки густини розподілу ймовірності для закону Гамма для всіх станів колії

На відміну від інших станів колії, незадовільний стан є невизначеним, оскільки задано лише нижню його межу 501 бал/км. Тому, враховуючи також те, що при такому стані не обов'язково припиняється рух поїздів, проводиться екстраполяція бальних оцінок та глибин осідань у більшу сторону.

Таблиця 1 – Визначення максимальних глибин осідань при ймовірності 0,9225 для всіх якісних станів колії

Бали за км	Бали за осідання на км	Максимальна глибина осідання при ймовірності 0,9225, мм	Максимально можлива глибина осідання при умові, що на 1 км трапитись одне осідання, мм
0-40	0-7	14,32	15
41-100	8-14	15,81	20
101-500	15-68	16,45	25
> 501	> 69	19,41	>45

Окрім глибин осідань, аналізується також довжини осідань і їх взаємозв'язок. З допомогою регресійного аналізу встановлено мінімальні для заданого рівня ймовірності 0,9225 довжини осідань при кожному якісному стані колії. Аналіз взаємозв'язку довжин та глибин осідань показав, що між ними взаємозв'язок практично відсутній, тобто певній глибині осідань можуть у однаковій мірі відповідати як короткі, так і довгі довжини осідань.

Зареєстровані вагоном-колієвимірювачем осідання є видозміненим відображенням фактичних вертикальних нерівностей колії, тому глибина та довжина осідання не відповідають тим самим параметрам фактичної нерівності. Знаходження зв'язку цих параметрів виконується із врахуванням геометричної схеми запису осідань вагоном-колієвимірювачем. Результати досліджень та розрахунків зведено в узагальнюючу таблицю 2.

Таблиця 2 – Залежність ухилу нерівності, максимальної глибини та мінімальної довжини нерівності від загальних бальних оцінок та оцінок за осідання/км

Якісний стан колії	Бали за км	Бали за осідання на км	Макс. глибина осідання при $p=0,9225$, мм	Мін. довжина осідання при $p=0,9225$, м	Коефіцієнт переходу до глибини нерівності	Макс. глибина нерівності при $p=0,9225$, мм	Мін. довжина нерівності при $p=0,9225$, м	Ухил нерівності, ‰
відмінно	0-40	0-7	14,32	3,61	0,54	7,73	7,22	2,143
добре	41-100	8-14	15,81	3,54	0,53	8,38	7,08	2,368
задовільно	101-500	15-68	16,45	3,52	0,52	8,55	7,03	2,433
незадовільно	501-1000	69-142	19,41	3,36	0,51	9,90	6,73	2,942
	1001-1500	143-215	21,57	3,16	0,50	10,78	6,32	3,412
	1501-2000	216-288	23,07	2,98	0,50	11,53	5,96	3,870
	2001-2500	289-361	24,27	2,82	0,50	12,14	5,64	4,304
	2501-3000	362-435	25,29	2,66	0,50	12,65	5,32	4,754
	3001-3500	436-508	26,20	2,52	0,50	13,10	5,04	5,198
	>3501	>509	27,00	2,38	0,50	13,50	4,76	5,672

У таблиці 2 для кожного якісного стану колії та відповідної бальної оцінки 1 км колії встановлено параметри ізольованої нерівності колії – максимальну глибину, мінімальну довжину, а також максимальний ухил нерівності.

Результати, отримані у даному розділі, використовуються у п'ятому розділі для розв'язання практичної задачі знаходження вертикальних сил дії необресорених мас рухомого складу на колію при певному геометричному стані колії.

Третій розділ присвячено розробці методів моделювання та ідентифікації параметрів колії для дослідження динамічних процесів, що виникають при взаємодії колії та рухомого складу. Під ідентифікацією параметрів колії розуміється експериментальне визначення її характеристик, які в подальшому використовуються для моделювання взаємодії колії та рухомого складу. Необхідність у експериментальному знаходженні характеристик колії викликана потребою збільшення точності моделювання, яка у значній мірі залежить від закладених у моделі характеристик колії, а також розробкою складніших моделей, що вимагають знання якісно нових характеристик.

Модель динамічної взаємодії колії та рухомого складу складається із моделі екіпажу та моделі колії. Модель екіпажу є плоска дискретна модель, яка складається із семи мас, кожна з яких має 2 ступені свободи, які з'єднані між собою пружно-дисипативними в'язями. Та частина моделі, яка відповідає залізничній колії, складається із двох еквівалентних мас для кожного колеса. Верхня маса відповідає приведеній масі рейки та вузла скріплення, а нижня – приведеній масі підрейкової основи. Приведені параметри маси, демпфірування та жорсткості розраховуються по континуальній моделі залізничної колії. Величини приведеної до точки контакту колеса та рейки жорсткості залежать від пружності відповідних елементів колії та розраховуються по континуальній моделі колії, яка являє собою подвійну балку Ейлера на пружнодисипативній Вінклерівській основі.

Континуальна динамічна модель колії, що складається із двох, розміщених одна на одній, безмежних балок Ейлера з розподіленими вздовж них масами, та з'єднаних безперервними в'язями, що відповідають основі Вінклера. Розрахункова схема континуальної моделі колії зображена на рис. 2. Верхня балка відповідає рейці і характеризується параметрами: масою 1 погонного метра m_1 , модулем Юнга E_1 та моментом інерції I_1 . В'язь, яка з'єднує її із нижньою

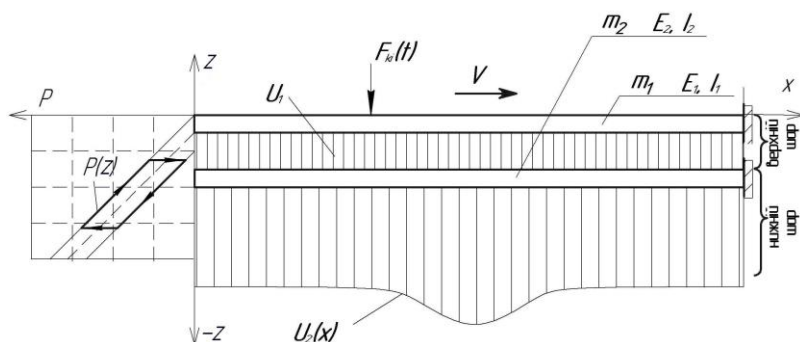


Рис. 2 – Розрахункова схема моделі залізничної колії

балкою, відповідає вузлам скріплення і характеризується параметрами: модулем пружності (коефіцієнтом постелі) U_1 , та в'язким тертям. Верхня балка із відповідною їй основою позначається як верхній шар. Нижня балка та безперервна в'язь, яка з'єднує її із нерухомою ос-

новою, відповідає під рейкової основи, за виключенням вузла скріплення, і має ті самі характеристики (m_2 , E_2 , I_2), що й верхня балка та позначається у даній роботі нижнім шаром, що показано на рис. 2. Вплив окремих шпал у даній моделі нехтується. Пружність підрейкової основи за виключенням вузла скріплення враховується як величина змінна вздовж колії.

Конструкція, для якої проводиться моделювання, є типовою для залізниць України: рейки Р65 (приймаються без зносу), шпали залізобетонні, скріплення КБ та КПП-5.

Зовнішнє точкове навантаження для 1-4 колеса представлено квазістатичним, рівнорозподіленим навантаженням на малій довжині l_F :

$$F_{zi}(x, t, V) = \begin{cases} 0, & \forall t \geq x, \\ q_{\text{ст}}(t), & \forall t \leq x \leq Vt + l_F, \\ 0, & \forall Vt + l_F \leq x, \end{cases} \quad (2)$$

де $q_{\text{ст}}(t)$ – рівнорозподілене статичне навантаження на довжині l_F , $q_{\text{ст}}(i) = \frac{F_{ki}(t)}{l_F}$;

$F_{ki}(t)$ – зовнішнє точкове навантаження.

Даній моделі відповідає система диференціальних рівнянь у часткових похідних. Рівняння, яке описує поведінку верхнього шару, являє собою лінійне однорідне диференційне рівняння із постійними коефіцієнтами, а рівняння нижнього шару, яке враховує нерівнопружність підрейкової основи за винятком пружності вузла скріплення, диференціальне рівняння зі змінними коефіцієнтами:

$$E_1 I_1 \frac{\partial^4 z_1(x, t)}{\partial x^4} + U_1(z_1(x, t) - z_2(x, t)) + m_1 \frac{\partial^2 z_1(x, t)}{\partial t^2} + f_1 \left(\frac{\partial z_1(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial z_2(x, t)}{\partial t} \right) = F_{31}(x, t, V) + F_{32}(x, t, V) + F_{33}(x, t, V) + F_{34}(x, t, V), \quad (3)$$

$$E_2 I_2 \frac{\partial^4 z_2(x, t)}{\partial x^4} + U_2(x) z_2(x, t) + m_2 \frac{\partial^2 z_2(x, t)}{\partial t^2} + f_2 \frac{\partial z_2(x, t)}{\partial t} = U_1(z_1(x, t) - z_2(x, t)) + f_1 \left(\frac{\partial z_1(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial z_2(x, t)}{\partial t} \right), \quad (4)$$

де m_1 – маса рейки, що приведена до її осі, 65 кг/м;

E_1 – модуль пружності рейкової сталі, $2 \cdot 10^{11}$ МПа;

I_1 – момент інерції рейки, $3548 \cdot 10^8$ м⁴;

U_1 – модуль пружності верхнього шару, досліджується та приймається від 100 до 200 МПа;

m_2 – маса нижнього шару, що приведена до його осі, 700 кг/м.

E_2 – умовний модуль пружності матеріалу нижнього шару, $0,1 \cdot 10^{11}$ МПа.

I_2 – умовний момент інерції нижнього шару, $0,1 \cdot 10^{12}$ м⁴.

$U_2(x)$ – функція зміни модуля пружності нижнього шару вздовж колії, яка відображає нерівність нерівнопружності колії.

Побудована модель дає змогу змодельовати процес взаємодії колії та рухомого навантаження при проходженні ним силової нерівності з різними швид-

костями, різною формою нерівності, різноманітними фізичними та геометричними характеристиками колії та рухомого навантаження. Розв'язання диференціальних рівнянь (3-4) виконується з допомогою методу кінцевих різниць при рівномірній сітці та п'ятиточковій різницевої схемі.

Приведена жорсткість, що відповідає вузлам скріплення (пружності верхнього шару) для кожного колеса c_{K01} , визначається через прогин $z_{2i}(Vt, t)$ під точками контакту коліс та рейки $F_{ki}(t)$:

$$c_{K01} = \frac{F_{ki}(t)}{z_{2i}(Vt, t)}. \quad (5)$$

Приведена жорсткість колії, що відповідає пружності нижнього шару для кожного колеса $c_{K11}(t), c_{K12}(t), c_{K13}(t), c_{K14}(t)$, визначається через прогин $z_{2i}(Vt, t)$ під точками контакту коліс та рейки $F_{ki}(t)$:

$$c_{Ki}(t) = \frac{F_{ki}(t)}{z_{2i}(Vt, t)}. \quad (6)$$

У першому наближенні у якості зовнішніх сил приймаються сили статичної дії коліс екіпажу на рейки $F_{ki}(t) = F_{cm}$.

Методика знаходження вертикальної нерівності. Для отримання геометричних характеристик нерівності колії у вертикальній площині розроблено методику знаходження вертикальної нерівності залізничної колії за даними вагона-колієвимірювача. Така методика дозволяє з прийнятною для інженерних розрахунків точністю отримати характеристику вертикальної нерівності колії в навантаженому стані, що дозволяє, на відміну від існуючих методів (нівелювання, ручні виміри методом хорд), врахувати також нерівнопружність підрейкової основи. Окрім того, такі результати дають можливість оперативно отримати фактичну інформацію про нерівність колії на значних ділянках колії.

В основі розрахунку лежить забезпечення виконання рівняння:

$$y(x) - y(x - L) - \left[\frac{L_e}{2L} (y(x + L_e) - y(x) + y((x - L) + L_e) - y(x - L_e)) \right] = f(x), \quad (7)$$

де $f(x)$ – функція, що відображає осідання на стрічці вагона-колієвимірювача;

$y(x)$ – функція вертикальної нерівності залізничної колії;

L – довжина бази візка вагона-колієвимірювача, $L = 2,7$ м;

L_B – довжина бази вагона-колієвимірювача, $L_B = 24,0$ м.

Методика визначення вертикальної пружності. Для отримання характеристик пружності підрейкової основи розроблено методику визначення вертикальної пружності колії під фактично діючими навантаженнями від рухомого складу. Метою розробки даної методики є експериментальне визначення нелінійної пружності підрейкових опор та розподілу цієї пружності вздовж осі колії. На відміну від традиційних методів виміру пружності колії, у запропонованій методиці є переваги: фактичне динамічне навантаження від рухомого складу, більша точність вимірів, відсутність спеціального навантажувального пристрою, що викликає менші витрати ресурсів і часу для проведення дослідження. Окрім того, така методика дає можливість суміщати із незначни-

ми змінами до схеми розміщення датчиків, які, зазвичай, використовуються при проведенні експериментальних досліджень, і таким чином додатково застосовувати для розрахунку натурні величини, які раніше використовувалися лише для оцінки напружено-деформованого стану колії.

В основі методики лежить визначення реакцій опор та їх прогинів за ре-

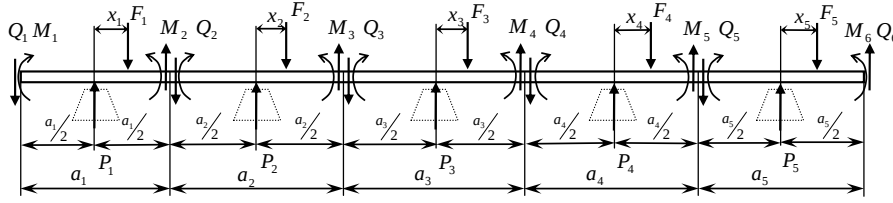


Рис. 3 – Розрахункова схема дії на рейку зовнішніх сил та зусиль у рейці

естрованими у натурних випробуваннях прогинах і нормальних напруженнях у рейці та вертикальних силах дії колеса на рейку з допомогою датчиків, що розмішують за

спеціальною схемою (рис. 3). Для розв'язання такої задачі розроблено алгоритм, який базується на розгляді ділянки колії як системи кінцевих елементів із шпали та відповідної їй рейки, які перебувають у рівновазі.

Із урахуванням умов рівноваги та нерозривності прогинів і їх похідних, рівняння для першого кінцевого елемента якщо у лівій частині їх невідомі величини, а у правій відомі:

$$\begin{cases} Q_1 + P_1 - Q_2 = F_1, \\ -\frac{1}{2}a_1Q_1 - \frac{1}{2}a_2Q_2 = -M_2 + M_1 + F_1x_1, \\ \frac{1}{48} \frac{(a_1 + a_2)^3}{EI} Q_1 + \frac{1}{48} \frac{a_2^3}{EI} P_1 + \frac{1}{2} (a_1 + a_2) \theta_1 + z_1 - z_2 = -\frac{\frac{1}{8} M_1 (a_1 + a_2)^2 - \frac{1}{6} F_1 (\frac{a_1}{2} - x_1)^3}{EI}, \\ \frac{1}{8} \frac{(a_1 + a_2)^2}{EI} Q_1 + \frac{1}{8} \frac{a_2^2}{EI} P_1 + \theta_1 - \theta_2 = -\frac{\frac{1}{2} M_1 (a_1 + a_2) - \frac{1}{2} F_1 (\frac{a_1}{2} - x_1)^2}{EI}, \end{cases} \quad (8)$$

де Q_i – поперечні сили в перетинах рейки, посередині шпальних прольотів;
 M_i – згинальні моменти в перетинах рейки, посередині шпальних прольотів;
 P_i – сили, які діють на рейку від шпал;
 F_i, x_i – зовнішні сили, які діють на рейку від рухомого складу;
 a_i – довжина кінцевого елемента розрахункової схеми;
 z_i – прогини в перетинах рейки, посередині шпальних прольотів;
 θ_i – кутові переміщення перетинів рейки, посередині шпальних прольотів.

У матричному вигляді $A_1 X_1 = B_1$, що відповідає системі рівнянь (8), мають вигляд:

вектор невідомих:

$$X_1^T = [Q_1 \ P_1 \ \theta_1 \ z_1 \ Q_2 \ P_2 \ \theta_2 \ z_2], \quad (9)$$

матриця коефіцієнтів та вектор вільних членів:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2}a_1 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2}a_2 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{48} \frac{(a_1 + a_2)^3}{EI} & \frac{1}{48} \frac{a_2^3}{EI} & \frac{1}{2}(a_1 + a_2) & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ \frac{1}{8} \frac{(a_1 + a_2)^2}{EI} & \frac{1}{8} \frac{a_2^2}{EI} & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad B_1 = \begin{pmatrix} F_1 \\ -M_2 + M_1 + F_1x_1 \\ -\frac{\frac{1}{8} M_1 (a_1 + a_2)^2 - \frac{1}{6} F_1 (\frac{a_1}{2} - x_1)^3}{EI} \\ -\frac{\frac{1}{2} M_1 (a_1 + a_2) - \frac{1}{2} F_1 (\frac{a_1}{2} - x_1)^2}{EI} \end{pmatrix}. \quad (10-11)$$

Загальна матриця коефіцієнтів A для N елементів дослідної ділянки, містить 4 додаткові граничні умови – прогини рейки Z_{k_1} і Z_{k_2} та поперечні сили Q_{k_1} і Q_{k_2} , які компенсують дію прилягаючих ділянок. Практичне використання методики та результати вимірів, описано у розділі 5.

Для визначення характеристик пружності колії експериментальним чином необхідно виміряти її деформації під навантаженнями. Існуючі засоби вимірювання прогинів рейки механічним способом мають суттєвий недолік, що пов'язаний із систематичною похибкою вимірювань до 100% від значення прогину. Для зменшення цієї похибки розроблено методику безконтактного виміру динамічного прогину рейки фотографічним методом. В основі такої методики лежить ідея віддалення основи, відносно якої проводяться вимірювання, поза межі зони, в якій виникають прогини, або туди, де прогини основи мають значення в межах задовольняючої похибки. Розробка методики включає вибір параметрів вимірювальної мітки, обґрунтування умов використання такої методики та створення алгоритмів автоматизованої обробки відеоінформації (рис.4).

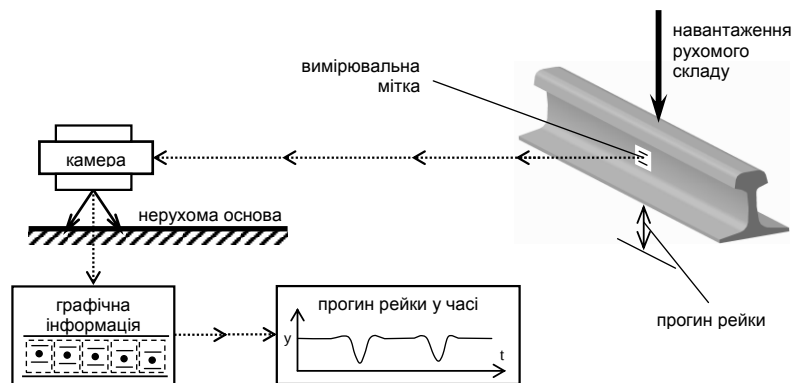


Рис. 4 – Принципова схема проведення вимірювань безконтактним методом

У четвертому розділі виконано експериментальну оцінку достовірності розроблених моделей та методик ідентифікації колії. Оцінка проводиться через порівняння параметрів напружено-деформованого стану колії і рівня силової дії рухомого складу на неї, які було отримано у експери-

ментальних дослідженнях та обчислено за розрахунковими методиками.

Експериментальні дослідження проводили на дослідній ділянці, яка знаходиться на 269–270 км парної колії двоколійної ділянки перегону Роздори–Письменна Придніпровської залізниці. Ділянка вибрана посередині кривої радіусом 1095 м. Конструкція колії безстикова з рейками типу Р65 на залізобетонних шпалах зі скріпленням КБ і епюрою 1840 шт./км; баласт – щебеневий. Для проведення досліджень був сформований дослідний состав із електровозів ЧС2 або ЧС7 (у голові та хвості) та пасажирського вагона. Поїздки дослідного составу виконували човником зі швидкостями 90, 100, 120, 130 та 140 км/год. На дослідній ділянці робили виміри ширини колії, її положення по рівню, виміряли стріли вигину рейок. На основі цих даних було вибрано місця встановлення вимірювальних приладів на колії. У процесі дослідів вимірювали напруження у кромках підшви та головки рейок, напруження на шийці рейок, прогини рейок, на основі яких розраховані вертикальні сили, що діють на рейки, поперечні зусилля та моменти сил у міжшпальних прогонах. Аналізували максимальні значення вимірюваних параметрів. Статистичний аналіз вимірюваних параметрів показує значний вплив випадкових факторів на динамічну взаємо-

дію, що виражається у значній відносній похибці, яка для вертикальних сил становить 15-19%, а для нормальних напружень у рейці – 20-26%. По вимірних величинах з допомогою розроблених методик обчислено пружність колії, а по стрічці вагона-колівимірювача визначено вертикальну нерівність колії.

Порівняння результатів експерименту та розрахунку показують що:

1. обчислені напруження у рейках на діапазоні швидкостей 90-140 км/год, відрізняються від середніх експериментальних до 11,2%;
2. величини вертикальних сил дії колеса на рейку, розраховані з допомогою моделі, відрізняються від середніх експериментальних на даному діапазоні швидкостей до 10,5%.

П'ятий розділ присвячено опису практичних результатів, отриманих у межах дисертаційної роботи.

За допомогою розробленої (у розділі 3) методики визначали вертикальні нерівності колії, які були використані у подальших розрахунках для оцінки силової дії рухомого складу на колію та перевірки розробленої моделі. Вертикальну пружність колії визначали на дослідній ділянці з метою подальшого використання у моделі взаємодії колії та рухомого складу. Розміщення вимірювальних приладів на колії здійснено у відповідності до потреб розробленої методики (розділ 3). По краях ділянки вимірювали поперечні у рейці сили з допомогою схеми із чотирьох тензодатчиків, а також вертикальні прогини кромки рейки. Як напруження, так і прогини по кромках підшви рейки усереднювали і таким чином приводили до осі підшви.

Посередині ділянки виконували виміри прогину рейки у міжшпальному прогоні з допомогою прогиномірів та розробленої (у розділі 3) методики безконтактного виміру динамічного прогину рейки фотографічним методом. Камеру розміщували від крайньої рейки на відстані 6 м. Порівнюючи максимальні значення прогину по традиційній методиці та по фотографічному методу (рис. 5), можна побачити, що прогин, виміряний фотографічним методом, приблизно у 1,5-2 рази більший від прогинів, виміряних тензометричними прогиномірами.

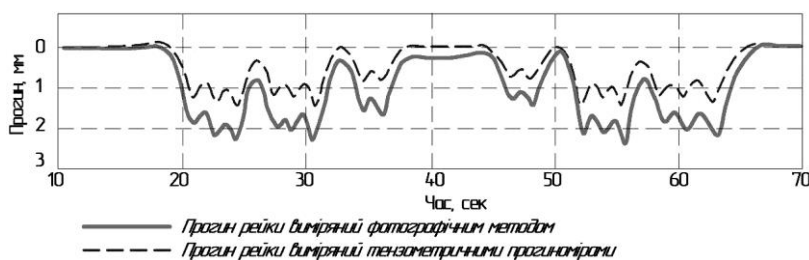


Рис. 5 – Порівняння прогинів, записаних фотографічним та тензометричним методом

Із урахуванням уточнення виміру прогинів за допомогою безконтактного методу визначено нелінійну пружність рейкових опор. У якості моделі нелінійної пружності опор прийнята аналітична дво-пара-метрова модель, у якій

залежність сили від прогину визначається:

$$P = \begin{cases} B(y + A)^\alpha - Q & \text{при } y > -A, \\ -Q & \text{при } y \leq -A, \end{cases} \quad (12)$$

де y – вертикальні переміщення шпали;

P – сила, що діє на шпалу;

Q – вага шпал, скріплень і частини баласту, що припадає на одну опору;

A – величина підйому шпали, при якій вага Q передається на рейку;

В і α – чисельні коефіцієнти.

Врахування фактичного геометричного стану колії у правилах розрахунку колії на міцність. Протягом усього міжремонтного періоду експлуатації залізничної колії геометричний стан колії значно змінюється в залежності від великої кількості факторів. Теоретично врахувати стан колії неможливо, тому пропонується враховувати фактичний геометричний стан, що може бути виміряний колієвимірними засобами, із яких найбільш використовуваним є вагон-колієвимірвач. Врахування фактичного стану колії може не тільки збільшити точність розрахунку, а й значно розширити можливості використання правил розрахунку колії на міцність: це встановлення допустимих швидкостей руху рухомого складу в залежності від фактичного стану колії, визначення раціональних умов утримання ділянок колії із різноманітними значеннями зовнішніх навантажень від рухомого складу та вантажонапруженості та інш.

Удосконалення методики виконується на основі розрахункових залежностей існуючої методики визначення сил дії необресорених мас в основі якої лежить їх визначення через середній ухил нерівності:

$$P_{ин} = k_p \cdot i \cdot \sqrt{qV}, \quad (13)$$

де k_p – коефіцієнт пропорційності;

q – маса необресореної частини екіпажу;

V – швидкість руху екіпажу;

i – ухил ізольованої вертикальної нерівності колії приймається таким, що залежить від конструкції колії та навантаження на неї:

$$i = A \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \varepsilon \cdot l \cdot \bar{P}, \quad (14)$$

де $A, \beta, \gamma, \varepsilon, l$ – коефіцієнти, які враховують конструкцію колії;

$\bar{P}$ – зовнішнє середнє навантаження від рухомого складу.

Для визначення сили дії необресорених мас в залежності від різноманітних факторів виконано багатоваріантні розрахунки на розробленій динамічній моделі взаємодії колії та рухомого складу по знаходженню впливу на силу дії необресорених мас параметрів геометричної нерівності та пружності колії. Для корегування відповідних інженерних залежностей розрахунку сил проводиться апроксимація результатів розрахунків по динамічній моделі залежністю виду (13) та знаходження умовного значення ухилу нерівності $i_{ум}$, при якому б значення сил інерції необресорених мас, що отримані по залежності (14), найбільше відповідали значенням сил інерції необресорених мас, що отримані по динамічній моделі із урахуванням верхньої довірчої межі інтервалу надійності відхилення середнього значення 99,4%.

Таким чином, значення динамічного навантаження колеса на рейку від сил інерції необресорених мас, що виникають при проході ізольованої нерівності колії, визначається за формулою:

$$S_n = \frac{\alpha_0 i_{ум} V \pi^2}{\sqrt{2g}} \sqrt{\frac{Uq}{k}}, \quad (15)$$

де $i_{ум}$ – умовний ухил, що характеризує стан колії;

V – швидкість руху, км/год;

U – модуль пружності підрейкової основи, МПа;

q – величина необресореної маси екіпажу, що припадає на одне колесо, кН;

k – коефіцієнт відносної жорсткості основи та рейки;

α_0 – коефіцієнт, що показує співвідношення приведених до точки контакту необресорених частин маси екіпажа m_e і маси колії m_k для колії з дерев'яними і залізобетонними шпалами.

Для врахування фактичного геометричного стану колії у вигляді прийнятої на залізницях України якісної чи бальної оцінки 1 км колії, використовуються результати дослідження по статистичній обробці та аналізі записів вагона-колієвимірювача (у розділі 2), що показують зв'язок бальної оцінки та параметрів ізольованої геометричної нерівності. Залежність умовного ухилу нерівності від якісного стану колії показано у таблиці 3.

Таблиця 3 – Значення ухилу $i_{ум}$ в залежності від якісного стану колії на кілометрі та бальної оцінки по осіданнях за 1 км

Загальний стан колії	Бали за км	Бали за осідання на км	Коефіцієнт $i_{ум}, \times 10^{-3}$
відмінно	0-40	0-7	1,01
добре	41-100	8-14	1,16
задовільно	101-500	15-68	1,20
незадовільно	501-1000	69-142	1,57
	1001-1500	143-215	1,96
	1501-2000	216-288	2,36
	2001-2500	289-361	2,79
	2501-3000	362-435	3,26
	3001-3500	436-508	3,76
	>3501	>509	4,31

Оцінка необхідної пружності рейкових скріплень. З допомогою розробленої моделі взаємодії колії та рухомого складу, а також експериментальних досліджень виконано оцінку необхідної пружності рейкових скріплень з точки зору роботи рейок та баластного шару. За критерії роботи рейок взято напруження та силу дії колеса на рейку, баластного шару – його деформації, прискорення, а також групу енергетичних критеріїв віброруйнації. У результаті дослідження отримано такі висновки.

1. За критерієм напружень в рейках.

Зміна вертикальної пружності скріплень в межах величин, які відповідають сучасному виконанню конструкції скріплень КБ-65, КПП-5, КПП-7 та умовам їх експлуатації, несуттєво впливає на напружений стан рейок. Наприклад, зменшення вертикальної жорсткості скріплення від 130 до 33 кН/мм веде до збільшення напружень розтягання підшви рейки в 1,2-1,3 рази, а рівень значень середніх екстремальних нормальних напружень збільшується з 74 МПа до 96 МПа, що однак значно менше допустимої величини.

2. За критерієм розладу (віброруйнації) баластового шару.

Дослідження роботи колії по динамічній моделі колії під дією вібраційного навантаження у діапазоні частот зовнішнього навантаження 100-300 Гц, що відповідає швидкості руху поїзда 100 км/год по нерівностях на колії чи колесах

довжиною 0,1-0,25 м (для швидкості 200 км/год довжина цих нерівностей подвоюється), показали, що зменшення вертикальної жорсткості вузла скріплення від 130 до 33 кН/мм зменшує кінетичну енергію деформації баластового шару на 70%, а рівень розсіювання енергії в баластовому шарі зменшується на 45%. При зниженні величини жорсткості вузла скріплення очікується зменшення динамічних сил взаємодії колеса і рейки, що призведе до зниження зношення рейок, зменшення вібрації рейко-шпальної решітки та баластового шару. Це зменшить рівень виходу з ладу інших елементів верхньої будови колії, розлад та вібророзрідження баластового шару при підвищеній його засміченості. В цілому все це призведе до зменшення матеріальних витрат, витрат праці на капітальні ремонти та поточне утримання колії.

Оскільки робота колії під вантажними поїздами відрізняється від роботи колії під пасажирськими поїздами, для залізниць України рекомендується вертикальна жорсткість вузла скріплення:

- 40 кН/мм для ділянок колії зі змішаним рухом, де за кількістю поїздів переважає пасажирський рух з вагонами існуючої конструкції;
- 60 кН/мм для ділянок колії зі змішаним рухом, якщо за кількістю поїздів переважає рух вантажних поїздів незалежно від конструкції скріплення та монтажних зусиль кріплення рейки до опори.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень вирішена науково-технічна задача підвищення ефективності експлуатації колії та зменшення розладнань елементів колії шляхом врахування впливу фізичних та геометричних характеристик залізничної колії на її напружено-деформований стан. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації дисертації полягають у наступному.

1. Оглядом існуючого стану колійної науки України встановлено наявність недоліків, неточностей та обмежень використання існуючих методів розрахунку напружено-деформованого стану колії та способів визначення її фізичних та геометричних характеристик. З'ясовано відсутність методик та правил, які б дозволяли як на теоретичному, так і на практичному інженерному рівнях оцінити вплив якісного геометричного стану 1 км колії, чи стану колії, вираженого бальною оцінкою, на надійність, довговічність та працездатність колії.

2. Статистичний аналіз зібраної на залізницях України інформації про фактичні нерівності колії та її якісний стан показав, що вертикальні нерівності колії випадковим чином розподілені вздовж колії, а їх параметри – глибина та довжина – підкоряються закону розподілу імовірності Гамма. При цьому, із усієї групи нерівностей виключаються ті, які належать до відмінного стану колії. Параметри закону Гамма для глибини осідань становлять: $a=13,22$ мм та $b=0,742$ мм. Середньоквадратична похибка оцінки параметрів a та b при надійності 95% становить $\sigma_a=0,47$ та $\sigma_b=0,027$. Таким чином, відносна похибка скла-

дає менш, ніж 5%, що цілком прийнятно для практичних інженерних розрахунків.

3. Аналіз взаємозв'язку довжин та глибин осідань показав, що між цими параметрами взаємозв'язок практично відсутній, тобто, певній глибині осідань можуть в однаковій мірі відповідати як короткі, так і довгі довжини осідань.

4. Знайдено значення характерної глибини та довжини нерівності для кожного якісного стану колії при заданому ступені імовірності їх виникнення, рівному 0,9225. Знайдені значення дозволяють робити висновки стосовно напружено-деформованого стану колії, що відповідає якісному стану геометрії колії.

5. Розрахунки показують, що максимально-ймовірна глибина осідання при рівні ймовірності 0,9225 змінюється від 14,32 мм до 27,0 мм при незадовільному стані. Знаходження зв'язку параметрів осідань із параметрами фактичних нерівностей виконано з врахуванням геометричної схеми запису осідань вагоном-колієвимірником.

6. Розроблено математичну та комп'ютерну модель динамічної взаємодії колії та рухомого складу, яку було використано для дослідження впливу фізичних та геометричних характеристик колії на її напружено-деформований стан, що виникає при проходженні рухомим складом вертикальної нерівності на колії. Така модель враховує вплив зміни геометричних та фізичних характеристик колії вздовж її осі. Порівняння розрахунків напружень у рейці по моделі та експериментально вимірюваних показує, що напруження у рейках та вертикальні сили дії колеса на них при діапазоні швидкостей 90-140 км/год відрізняються від середніх експериментальних величин не більш ніж на 10-11%.

7. На основі багатоваріантних розрахунків за допомогою розробленої моделі запропоновано практичні рекомендації щодо удосконалення методики розрахунку колії на міцність та врахування фактичного геометричного стану колії у вигляді окремих нерівностей чи якісного стану 1 км колії. Розрахунки показують, що середній ухил вертикальної нерівності змінюється від 1,01% при відмінному стані 1 км колії до 4,31% при незадовільному стані. Врахування фактичного стану колії значно розширює можливості використання правил розрахунку колії на міцність: це встановлення допустимих швидкостей руху рухомого складу в залежності від фактичного стану колії, визначення раціональних умов утримання ділянок колії із різноманітними значеннями зовнішніх навантажень від рухомого складу та вантажонапруженості.

8. Створена методика знаходження вертикальної нерівності залізничної колії за даними вагона-колієвимірника дозволяє з прийнятною для інженерних розрахунків точністю отримати характеристику вертикальної нерівності колії в навантаженому стані, що дозволяє, на відміну від існуючих методів (нівелювання, ручні виміри методом хорд), враховувати також нерівнопружність під рейкової основи. Така методика дозволяє не тільки визначити вертикальні нерівності рейкових ниток, а також контролювати похибку визначення нерівності завдяки використанню записів перекосів колії. Аналіз похибки визначених нерівностей колії показав, що вона становить не більш ніж 7-10%. Методики визначення вертикальної нерівності та пружності колії використано у роботах

по встановленню допустимих швидкостей руху на ділянках колії, на яких було виконано ремонти колії із використанням важких колійних машин.

9. Розроблена методика визначення нелінійної вертикальної пружності колії під фактично діючими навантаженнями від рухомого складу, на відміну від традиційних методів виміру пружності колії, дозволяє врахувати фактичне динамічне навантаження від рухомого складу та уникнути використання спеціального навантажувального пристрою. Окрім того, така методика дає можливість визначити параметри нелінійної пружності окремих опор та їх розподіл вздовж осі колії.

10. Розроблена методика безконтактного виміру динамічного прогину рейки фотографічним методом дає можливість виміряти абсолютний прогин рейки та значно зменшити систематичну похибку виміру. Порівняння записів прогинів за розробленою методикою із записами тензометричних прогиномірів показує, що прогин, виміряний фотографічним методом, приблизно у 1,5-2 рази більший від прогинів, виміряних тензометричними прогиномірами.

11. На основі комплексних експериментально-теоретичних досліджень виконано оцінку необхідної пружності рейкових скріплень з точки зору роботи рейок та баластного шару. Для залізниць України рекомендується вертикальна жорсткість вузла скріплення для ділянок колії зі змішаним рухом, де за кількістю поїздів переважає пасажирський рух з вагонами існуючої конструкції 40 кН/мм, а для ділянок колії зі змішаним рухом, де за кількістю поїздів переважає рух вантажних поїздів, 60 кН/мм, незалежно від конструкції скріплення та монтажних зусиль кріплення рейки до опори.

Основні положення і результати дисертації опубліковано у таких роботах:

1. Сисин М.П., Рибкін В.В. Знаходження вертикальної нерівності залізничної колії за даними вагона-колієвимірювача // Дніпропетровськ: Вісник ДНУЗТ. – 2003. – Вип. 2. – С. 24-29.
2. М.П. Сисин, В.В. Рибкін, О.М. Патласов, Дослідження динамічних коливань балки на пружній дисипативній основі під дією рухомого навантаження при проходженні силової нерівності колії // Дніпропетровськ: Вісник ДНУЗТ. – 2004. – Вип. 5. – С. 188-193.
3. Рибкін В.В., Баль О.М., Бондаренко І.О., Сисин М.П. Інженерний розрахунок залізничної колії на міцність // Залізничний транспорт України. – 2005. – № 2. – С. 40-44.
4. Уманов М.И., Цыганенко В.В., Сысын Н.П., Курган Д.Н. Скорости движения в кривых после ремонта // Путь и путевое хозяйство. – М., 2007. – № 10. – С. 29-30.

Додаткові праці:

5. Сисин М.П., Рибкін В.В. Вплив стану колії на сили її взаємодії з рухомих складом у розрахунках колії на міцність // Тези доповідей першої науково-практичної конференції "Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління". – Київ, 2003. – С. 68-69.
6. Сисин М.П., Рибкін В.В. Модель залізничної колії на окремих опорах із нелінійною жорсткістю та динамічними властивостями // Тезиси докладов ХІ

Международной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта". – Днепропетровск, 2004. – С. 151.

7. М.И. Уманов, В.В. Цыганенко, А.Г. Рейдемейстер, Д.Н. Курган, Н.В. Халипова, Н.Г. Ренгач, В.В. Ковалев, Н.П. Сысын. Теоретические и экспериментальные исследования по установлению допускаемых скоростей движения поездов по участку пути, отремонтированному с применением современных путевых машин // Труды Международной научно-практической конференции "Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути и инженерных сооружений. Повышение качества подготовки специалистов и уровня научных исследований". – Москва, 2004. – С. III-10-12.

8. Рыбкин В.В., Сысын Н.П. Определение упругодиссипативных характеристик пути под динамическими нагрузками // Труды Международной научно-практической конференции "Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути и инженерных сооружений. Повышение качества подготовки специалистов и уровня научных исследований". – Москва, 2004. – С. IV-46.

9. Рыбкин В.В., Баль О.М., Бондаренко И.А., Сысын Н.П. Предложения по корректировке правил расчета железнодорожного пути на прочность // Труды Международной научно-практической конференции "Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути и инженерных сооружений. Повышение качества подготовки специалистов и уровня научных исследований". – Москва, 2004. – С. IV-48.

10. Уманов М.И., Цыганенко В.В., Сысын Н.П., Курган Д.Н. Допускаемые скорости движения пассажирских поездов в кривых участках пути, отремонтированных с использованием современных путевых машин // Труды Международной научно-практической конференции "Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути и инженерных сооружений". – Москва, 2006. – С. 178-181.

11. Сисин М.П., Уманов М.І. Вимірювання жорсткості колії із використанням відеозйомки // Труды 67 Международной научно-практической конференции "Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта". – Днепропетровск, 2007. – С. 189-190.

АНОТАЦІЯ

Сисин М.П. Вплив фізичних та геометричних характеристик залізничної колії на її напружено-деформований стан. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.06 – залізнична колія, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2008.

Дисертація присвячена задачі підвищення ефективності експлуатації колії та зменшення розладнань елементів колії шляхом встановлення допустимих

експлуатаційних умов та необхідних параметрів пружності елементів колії експериментально-теоретичними методами.

На основі зібраної на залізницях України інформації про фактичні нерівності колії та статистичного аналізу, виконано узагальнення параметрів нерівності по відношенню до існуючої якісної оцінки стану 1 км колії.

Розроблено модель динамічної взаємодії колії та рухомого складу у вертикальній площині, яка дозволяє отримати параметри напружено-деформованого стану колії у їх динаміці при проходженні рухомим складом геометричних нерівностей та нерівностей нерівнопружності підрейкової основи. Для достовірного визначення вертикальної геометрії колії було розроблено методику знаходження вертикальної нерівності залізничної колії по даних вагона-колієвимірника. Розроблено методику визначення вертикальної пружності колії під фактично діючими навантаженнями від рухомого складу та методику безконтактного виміру динамічного прогину рейки фотографічним методом, яка дозволяє виключити систематичну похибку виміру прогину рейки, що може досягати 60%.

На основі комплексних експериментально-теоретичних досліджень виконано оцінку необхідної пружності рейкових скріплень з точки зору роботи рейок та баластного шару.

Ключові слова: напружено-деформований стан, пружність елементів колії, підрейкова основа, вертикальна геометрія колії, моделювання, ідентифікація параметрів колії, динамічна взаємодія колії та рухомого складу.

АННОТАЦИЯ

Сысын Н.П. Влияние физических и геометрических характеристик железнодорожного пути на его напряженно-деформированное состояние. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.06 – железнодорожный путь, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2008.

Диссертация посвящена задаче повышения эффективности эксплуатации пути и уменьшения расстройств элементов пути путем установления допустимых эксплуатационных условий и необходимых параметров упругости элементов пути экспериментально-теоретическими методами.

На основе собранной на железных дорогах Украины информации о фактических неровностях пути и статистического анализа выполнены обобщения параметров неровностей по отношению к существующей качественной оценке состояния 1 км пути. На основании статистического анализа впервые определены закономерности вероятностного распределения параметров геометрических неровностей пути в вертикальной плоскости и их взаимосвязь с существующей бальной оценкой состояния пути. Это дает возможность учета в разработанных моделях обобщенного геометрического состояния одного кило-

метра пути в соответствии с существующей классификацией качественной оценки состояния пути.

Разработано модель динамического взаимодействия пути и подвижного состава в вертикальной плоскости, которая позволяет получить параметры напряженно-деформированного состояния пути в их динамике при прохождении подвижным составом геометрических неровностей и неровностей неравноупругости подрельсового основания. Модель пути представлена системой из двух континуальных балок Ейлера, которые соединены между собой упруго-диссипативным основанием Винклера. Модель подвижного состава соответствует грузовому полувагону и представлена плоской системой из 7 сосредоточенных масс.

Для достоверного определения вертикальной геометрии пути была разработана методика нахождения вертикальной неровности железнодорожного пути по данным вагона-путеизмерителя. Такая методика позволяет с приемлемой для инженерных расчетов точностью получить характеристику вертикальной неровности пути в нагруженном состоянии на значительных участках пути.

Разработана методика определения вертикальной упругости пути под фактически действующими нагрузками от подвижного состава, которая позволяет определить как нелинейные свойства упругости подрельсовых опор, так и их распределение вдоль пути. Такая методика в отличие от существующих методов определения упругости пути имеет преимущества: отсутствие специального нагрузочного устройства, уменьшение затрат ресурсов и времени для проведения испытаний. Кроме того, такая методика дает возможность совмещать выполнение измерений без значительных изменений в существующих схемах размещения датчиков.

Для более точного определения параметров упругости пути разработана методика бесконтактного измерения динамического прогиба рельса фотографическим методом, что позволяет исключить систематическую погрешность измерения прогиба рельса, которая может достигать 60%.

С помощью разработанных теоретических и экспериментальных моделей и методик выполнены комплексные исследования влияния вертикальной геометрии и характеристик упругости пути на его напряженно-деформированное состояние и уровень силового воздействия колеса на рельс. На основе выполненного исследования предложены практические рекомендации по усовершенствованию методики расчета пути на прочность и учету фактического геометрического состояния пути в виде отдельных неровностей или качественного состояния 1 км пути.

На основе комплексных экспериментально-теоретических исследований выполнена оценка необходимой упругости рельсовых креплений с точки зрения работы рельсов и балластного слоя. Для железных дорог Украины рекомендуется вертикальная жесткость узла крепления для участков пути со смешанным движением, где за количеством поездов преобладает пассажирское движение 40 кН/мм, а для участков пути со смешанным движением, где за количеством преобладает движение грузовых поездов – 60 кН/мм независимо от конструкции крепления.

Полученные теоретические и практические результаты были неоднократно использованы при выполнении научно-исследовательских работ по заданию Главного управления путевого хозяйства Укрзализныци.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, упругость элементов пути, подрельсовое основание, вертикальная геометрия пути, моделирование, идентификация параметров пути, динамическое взаимодействие пути и подвижного состава.

ABSTRACT

Sysyn M. P. The influence of physical and geometrical parameters of the railway track on its mode of deformation. – Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science on a speciality 05.22.06 - "Railway Track". - Dnipropetrovsk national university of railway transport named after Academician V. Lazaryan; Dnipropetrovsk, Ukraine, 2008.

The thesis is dedicated to the problem of increase of efficiency of track operation and reduction of railway track elements faults by means of establishment of permissible working conditions and necessary parameters of railway track elements elasticity with the help of experimental and theoretical methods.

On the basis of collected data on the Ukrainian railways about actual track irregularities and statistical analysis, generalizations of track irregularity parameters with respect to existing qualitative state assessment per 1 km of railway track were drawn.

A model of railway track and rolling stock dynamic interaction in a vertical plane was designed. The method of determination of vertical track irregularity according to track measurement car data was designed with the purpose to define reliable vertical track geometry. To measure experimentally elasticity and underrail basis inhomogeneity, the methods of vertical track elasticity determination under actual loads was worked out. Also the methods of non-contact measuring of dynamic rail deflection was designed with the help of photographic method, which made possible to exclude systematical error in measuring of dynamic rail deflection up to 60%.

By means of designed theoretical and experimental models and methods complex investigations of vertical track geometry and elasticity parameters influence on its mode of deformation and wheel-rail interaction were carried out

Keywords: mode of deformation, railway track elements elasticity, underrail basis, vertical track geometry, modeling, track parameters identification, railway track and rolling stock dynamic interaction.

Рис. 7 –
Схема об-
ладнання



Сисин Микола Петрович

ВПЛИВ ФІЗИЧНИХ ТА ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ НА ЇЇ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН

Автореферат

дисертації на здобуття вченого ступеня

кандидата технічних наук

Підписано до друку ”___” _____ 2008 р.

Формат 60x84 1/16. Папір для множильних апаратів. Ризограф.

Ум. др. арк 0,9. Обл.-вид. л. 1,0. Тираж 100 прим.

Замовлення № _____. Безкоштовно.

Видавництво Дніпропетровського національного університету

залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

ДК № 1315 від 31.03.2003

Адреса видавництва і дільниці оперативної поліграфії:

49010, Дніпропетровськ, вул. Акад. Лазаряна, 2.

www.diitrvv.dp.ua;

admin@diitrvv.dp.ua.